



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Metodología de validación para el proceso de  
implementación de inductores fabricados  
mediante tecnología aditiva para tratamiento  
térmico**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA**

**Luis Enrique Llamas Loredó**

**ASESORES DE TESIS**

**Dr. Luis Daniel Aguilera Camacho**

**M.C. José Antonio Torres Castillo**

**CELAYA, GTO.**

**ENERO 2024**

## **DEDICATORIA**

La presente tesis la dedico con mucho cariño a mis padres que han confiado en mí siempre y que Dios me ha permitido compartir con ellos toda mi vida, que me han ayudado en momentos difíciles y sé que contaré con ellos incondicionalmente, han sido mi ejemplo de perseverancia y resiliencia.

También a mis hermanos para que tomen mi ejemplo de luchar por sus sueños a pesar de las adversidades que se puedan presentar en sus proyectos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco inmensamente a Dios por prestarme la salud y la vida para iniciar la maestría y concluirla satisfactoriamente.

A mi familia, especialmente a mis padres que me apoyaron desde que les compartí mi deseo por entrar a un posgrado y en todo momento a lo largo de este tiempo.

A mis asesores de tesis, al Dr. Luis Daniel Aguilera, asesor interno, por su disposición a compartir su conocimiento e información para el desarrollo del proyecto y la posterior elaboración de la tesis. Al M.C. José Antonio Torres, asesor en GKN, por su apoyo y guía en la empresa para el desarrollo del proyecto.

A mis profesores que compartieron un poco de su conocimiento a lo largo de las asignaturas impartidas.

A todos ustedes gracias y a los que de alguna u otra manera me alentaron y formaron parte de este proceso, eternamente gracias.

# Índice General

|                                                                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÍNDICE GENERAL .....</b>                                                                                         | <b>I</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                                                                                       | <b>III</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>                                                                                        | <b>V</b>   |
| <b>RESUMEN .....</b>                                                                                                | <b>I</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                               | <b>II</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                                           | <b>III</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA .....</b>                                                                         | <b>1</b>   |
| 1.1. ANTECEDENTES .....                                                                                             | 1          |
| 1.2. ESTADO DEL ARTE .....                                                                                          | 2          |
| 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                                                                | 4          |
| 1.4. OBJETIVOS.....                                                                                                 | 4          |
| 1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....                                                                                        | 4          |
| 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                  | 4          |
| 1.5. HIPÓTESIS .....                                                                                                | 5          |
| 1.6. JUSTIFICACIÓN.....                                                                                             | 5          |
| 1.7. ALCANCE.....                                                                                                   | 6          |
| <b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....</b>                                                                                | <b>8</b>   |
| 2.1. FLECHAS DE VELOCIDAD CONSTANTE .....                                                                           | 8          |
| 2.2. TRATAMIENTO TÉRMICO.....                                                                                       | 10         |
| 2.3. TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN.....                                                                         | 17         |
| 2.4. BOBINAS DE INDUCCIÓN .....                                                                                     | 24         |
| 2.5. MANUFACTURA ADITIVA.....                                                                                       | 29         |
| <b>CAPÍTULO 3 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....</b>                                                                 | <b>33</b>  |
| 3.1. DIAGRAMA DE FLUJO .....                                                                                        | 33         |
| 3.2. ETAPA DE DISEÑO DEL INDUCTOR .....                                                                             | 40         |
| 3.3. ETAPA DE SIMULACIÓN DE ELEMENTO FINITO PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN.....                          | 41         |
| 3.4. ETAPA DE DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D POR SIMULACIÓN CON SOFTWARE DE ELEMENTO FINITO ..... | 42         |
| 3.5. ETAPA DE CORRIDA DE PROTOTIPO DE INDUCTOR 3D PARA TRATAMIENTO TÉRMICO .....                                    | 43         |
| <b>CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....</b>                                                            | <b>49</b>  |
| 4.1. DISEÑO DEL INDUCTOR.....                                                                                       | 49         |
| 4.2. SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO .....                                                                        | 53         |
| 4.3. DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D .....                                                         | 57         |
| 4.4. PUESTA A PUNTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.....                                                                    | 61         |
| <b>CAPÍTULO 5 VALIDACIÓN DEL PROCESO .....</b>                                                                      | <b>67</b>  |
| 5.1. VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL INDUCTOR A TRAVÉS DE LA LIBERACIÓN DEL PROCESO. ....                                 | 67         |
| 5.2. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO A TRAVÉS DE LA LIBERACIÓN DEL PROCESO.....                  | 68         |
| 5.3. VALIDACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D DEL INDUCTOR A TRAVÉS DE LA LIBERACIÓN DEL PROCESO .....                         | 69         |
| 5.4. CASO DE ESTUDIO, IMPLEMENTACIÓN INDUCTOR G 133 B .....                                                         | 70         |

|                        |    |
|------------------------|----|
| CONCLUSIÓN .....       | 87 |
| TRABAJOS FUTUROS ..... | 88 |
| REFERENCIAS .....      | 89 |
| ANEXOS .....           | 91 |

# Índice de Figuras

## CAPÍTULO 2

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 UBICACIÓN DE LA CV JOINT EN EL AUTOMÓVIL. ....                                                                                                               | 8  |
| FIGURA 2.2 ENSAMBLE DE UNA CV JOINT. ....                                                                                                                               | 9  |
| FIGURA 2.3 VISTA EXPLOSIONADA DE UNA CV JOINT. ....                                                                                                                     | 9  |
| FIGURA 2.4 DIAGRAMA HIERRO-CARBONO DEL ACERO. ....                                                                                                                      | 12 |
| FIGURA 2.5 RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE CARBONO Y LA DUREZA. ....                                                                                                     | 14 |
| FIGURA 2.6 MICROFOTOGRAFÍA DE ESTRUCTURA MARTENSÍTICA 500X. ....                                                                                                        | 15 |
| FIGURA 2.7 MUESTRA DE TAMAÑO DE GRANO No. 8, A) RED HEXAGONAL IDEALIZADA PARA TAMAÑO MEDIO DE GRANO No. 8, ESCALA ASTM, B) GRANOS REALES OBTENIDOS DE UNA MUESTRA. .... | 16 |
| FIGURA 2.8 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUCIDO POR INDUCTOR SOBRE UNA PIEZA DE TRABAJO. ....                                                                               | 19 |
| FIGURA 2.9 EFECTO DE LA HISTÉRESIS EN LA VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO. N: NORTE; S: SUR, EN UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO. ....                                              | 20 |
| FIGURA 2.10 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN. ....                                                                                          | 24 |
| FIGURA 2.11 DIAGRAMA DE FLUJO DE DOS CONDUCTORES PARALELOS QUE TRANSPORTAN CORRIENTE EN DIRECCIONES OPUESTAS. ....                                                      | 25 |
| FIGURA 2.12 DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE BOBINA TRANSVERSAL. ....                                                                                                          | 26 |
| FIGURA 2.13 DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE EN CONDUCTOR RECTO. ....                                                                                                          | 28 |
| FIGURA 2.14 COMPARACIÓN ENTRE MANUFACTURA CONVENCIONAL Y MANUFACTURA ADITIVA. ....                                                                                      | 29 |
| FIGURA 2.15 CLASIFICACIÓN DE AM SEGÚN ESTADO DE MATERIA PRIMA. ....                                                                                                     | 31 |
| FIGURA 2.16 DIAGRAMA DE LA SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER. ....                                                                                                      | 32 |

## CAPÍTULO 3

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 3.1 INDUCTOR DE FABRICACIÓN CONVENCIONAL. ....                                                 | 34 |
| FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL TRATO DE LOS INDUCTORES DE FABRICACIÓN TRADICIONAL. ....         | 35 |
| FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL TRATO DE LOS INDUCTORES FABRICADOS CON MANUFACTURA ADITIVA. .... | 36 |
| FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA ESPERADA. ....                                                  | 38 |
| FIGURA 3.5 DIAGRAMA DEL PROCESO DE VALIDACIÓN MEDIANTE LA PUESTA A PUNTO. ....                        | 39 |
| FIGURA 3.6 ENTRADAS Y SALIDAS DE CADA ETAPA DEL PROCESO. ....                                         | 40 |
| FIGURA 3.7 DIAGRAMA DEL PROCESO SIMULACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D. ....                                   | 42 |
| FIGURA 3.8 ENSAMBLE DE INDUCTOR, DISPUESTO PARA SER LLEVADO A LA MÁQUINA DE TEMPLE. ....              | 44 |
| FIGURA 3.9 PLANO PARA LA EVALUACIÓN DE CAPA DE TEMPLE. ....                                           | 47 |

## CAPÍTULO 4

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.1 DISEÑO CAD APROXIMADO DEL COMPONENTE PARA TRATAMIENTO TÉRMICO. ....                                         | 50 |
| FIGURA 4.2 DISEÑO DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE VALIDACIÓN. ....                                                     | 52 |
| FIGURA 4.3 PLANO DEL ENSAMBLE DEL INDUCTOR. ....                                                                       | 53 |
| FIGURA 4.4 ENSAMBLE PARA LA SIMULACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO. ....                                                   | 54 |
| FIGURA 4.5 PERFIL DE TEMPERATURA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO. ....                                                       | 55 |
| FIGURA 4.6 PERFIL DE ENDURECIMIENTO PARA DOS TIPOS DE GUÍAS DE UNA JUNTA FIJA. ....                                    | 56 |
| FIGURA 4.7 PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN CON LA GENERACIÓN DE SOPORTES (EXTRAÍDO DE LA PÁGINA DE SIMUFACT ADDITIVE). .... | 58 |
| FIGURA 4.8 ENSAMBLE DEL INDUCTOR PARA TEMPLE POR TRATAMIENTO TÉRMICO. ....                                             | 62 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.9 INDUCTOR MONTADO, DISPUESTO PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO..... | 63 |
| FIGURA 4.10 ESPECIFICACIONES DE UNA MÁQUINA DE TEMPLE .....             | 63 |
| FIGURA 4.11 DISPLAY DE MÁQUINA DE TEMPLE. ....                          | 64 |
| FIGURA 4.12 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA PIEZA TRATADA TÉRMICAMENTE. .... | 65 |
| FIGURA 4.13 TOLERANCIAS DE DIMENSIONES DE TEMPLE. ....                  | 65 |

## CAPÍTULO 5

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 5.1 VALIDACIÓN DE LAS ETAPAS DE DISEÑO DEL INDUCTOR. ....                                                         | 67 |
| FIGURA 5.2 RESUMEN DE INFORMACIÓN DE LA ETAPA DE DISEÑO. ....                                                            | 68 |
| FIGURA 5.3 RESUMEN DE INFORMACIÓN DE ETAPA DE SIMULACIÓN DE TT. ....                                                     | 69 |
| FIGURA 5.4 RESUMEN DE INFORMACIÓN DE ETAPA DE SIMULACIÓN DE TT. ....                                                     | 70 |
| FIGURA 5.5 APARTADO DE DISEÑO DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE VALIDACIÓN .....                                           | 72 |
| FIGURA 5.6 APARTADO DE LA SIMULACIÓN DE TT DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE VALIDACIÓN (1/2)                              | 74 |
| FIGURA 5.7 APARTADO DE LA SIMULACIÓN DE TT DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE VALIDACIÓN (2/2)                              | 75 |
| FIGURA 5.8 APARTADO DE LA SIMULACIÓN DE IMPRESIÓN 3D DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE<br>VALIDACIÓN (1/2).....            | 77 |
| FIGURA 5.9 APARTADO DE LA SIMULACIÓN DE IMPRESIÓN 3D DEL INDUCTOR EN EL PROTOCOLO DE<br>VALIDACIÓN (2/2).....            | 78 |
| FIGURA 5.10 APARTADO DE LOS PARÁMETROS DE LIBERACIÓN PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO .....                                   | 80 |
| FIGURA 5.11 HOJA DE LIBERACIÓN DE LA PUESTA A PUNTO OTORGADA POR EL LABORATORIO<br>METALGRÁFICO.....                     | 81 |
| FIGURA 5.12 RESUMEN DE LA VALIDACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN INDUCTOR FABRICADO CON<br>TECNOLOGÍA ADITIVA .....       | 82 |
| FIGURA 5.13 HISTÓRICO DE VARIACIÓN DE DE PARÁMETROS DE TRABAJO DE UN INDUTOR DE FABRICACIÓN<br>ADITIVA.....              | 84 |
| FIGURA 5.14 COMPARACIÓN DEL DIÁMETRO DE UN INDUCTOR FABRICADO CON TECNOLOGÍA ADITIVA A LO<br>LARGO DE SU PRODUCCIÓN..... | 85 |
| FIGURA 5.15 COMPARACIÓN DEL DIÁMETRO DE UN INDUCTOR FABRICADO CON TECNOLOGÍA ADITIVA A LO<br>LARGO DE SU PRODUCCIÓN..... | 86 |

# Índice de Tablas

## CAPÍTULO 2

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE ALEACIONES DE CARBONO Y ACERO. .... | 11 |
|----------------------------------------------------------------|----|

## CAPÍTULO 3

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 3.1 PARÁMETROS DE TRABAJO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO..... | 46 |
|---------------------------------------------------------------|----|

## CAPÍTULO 5

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 4.1 PARÁMETROS PARA SIMULACIÓN DE TT. ....                                        | 55 |
| TABLA 4.2 DIMENSIONES DEL PERFIL DE TRANSFORMACIÓN OBTENIDO EN LA SIMULACIÓN DE TT..... | 56 |
| TABLA 4.3 CONFIGURACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA IMPRESIÓN 3D. ....                      | 58 |
| TABLA 4.4 PARÁMETROS PARA LA IMPRESIÓN DE LA BOBINA 3D.....                             | 59 |

## Resumen

El presente trabajo documenta el desarrollo de una metodología necesaria para la validación del proceso de implementación de inductores fabricados mediante tecnología aditiva (bobinas de cobre) para el temple de un componente de las flechas de velocidad constante denominado como junta fija.

Lo anterior respondiendo a la necesidad de aplicar este tratamiento térmico en ciertas zonas del componente a fin de lograr las propiedades mecánicas necesarias para su aplicación, para lo cual se utiliza el calentamiento por inducción como herramienta para lograr el temple, en dicho proceso el inductor es la herramienta principal.

La fabricación de estos inductores se pretende migrar de métodos convencionales utilizados actualmente como lo son los maquinados de piezas y doblado de tubo de cobre que se unen mediante soldadura, para lo cual no existe una metodología de validación bien establecida para su implementación, a la impresión 3D de cobre, así mismo se adopta la simulación de tratamiento térmico por elemento finito con la finalidad de definir los parámetros iniciales para la puesta a punto.

Dicha metodología contempla el desarrollo del proceso durante 5 etapas principales:

1. Diseño del inductor.
2. Simulación de tratamiento térmico.
3. Determinación de la factibilidad de impresión 3D.
4. Fabricación de la bobina mediante manufactura aditiva.
5. Corrida y puesta a punto.

La validación del proceso se corrobora en la última etapa (puesta a punto) generando un documento denominado como protocolo de validación que en última instancia comprueba la funcionalidad del prototipo desde su propuesta de diseño, hasta su obtención física asegurando la calidad de los inductores y demostrando que los resultados obtenidos son aceptables para el temple de los componentes dentro de la producción a través de una evaluación metalográfica.

## **Abstract**

The present work documents the development of a methodology necessary for the validation of the implementation process of inductors manufactured using additive technology (copper coils) for the tempering of a component of the constant velocity arrows called a fix joint.

The above is in response to the need to apply this heat treatment in certain areas of the component in order to achieve the mechanical properties necessary for its application, for which induction heating is used as a tool to achieve tempering, in this process the inductor is the main tool.

The manufacturing of these inductors is intended to migrate from conventional methods currently used, such as machining parts and bending copper tubes that are joined by welding, for which there is no well-established validation methodology for its implementation, to printing. 3D copper, likewise the finite element heat treatment simulation is adopted in order to define the initial parameters for the fine-tuning.

This methodology contemplates the development of the process during 5 main stages:

1. Inductor design.
2. Simulation of heat treatment.
3. Determination of the feasibility of 3D printing.
4. Manufacturing of the coil through additive manufacturing.
5. Run and set-up.

The validation of the process is corroborated in the last stage (set-up) by generating a document called a validation protocol that ultimately verifies the functionality of the prototype from its design proposal to its physical obtaining, ensuring the quality of the inductors and demonstrating that the results obtained are acceptable for tempering the components within production through a metallographic evaluation.

## Introducción

Las flechas de velocidad (CV-Joint) constante son un componente esencial para el funcionamiento de los vehículos actualmente, su fabricación incluye una gran gama de complejos procesos que día a día se mejoran a fin de hacer más eficiente su producción, uno de estos procesos es el tratamiento térmico que se debe aplicar a algunos de sus componentes, esto con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas como dureza y resistencia en las zonas expuesta a mayor desgaste para asegurar su funcionalidad.

Actualmente, para la producción de los componentes de las CV-Joint, este tratamiento térmico se realiza apoyándose del calentamiento por inducción, el cual es un fenómeno electromagnético que induce un aumento de temperatura en el componente a través de un campo magnético generado al alimentar una bobina de cobre (inductor) con una corriente eléctrica y colocándola lo suficientemente cerca de este.

Controlando este calentamiento y direccionándolo a zonas específicas del componente mediante los parámetros de la corriente eléctrica suministrada a la bobina, en combinación con un enfriamiento controlado aplicado posteriormente con un refrigerante de ciertas propiedades, se logra el tratamiento térmico y se obtienen las propiedades mecánicas deseadas para la aplicación.

El proyecto se centra en el desarrollo y aplicación de una metodología que permita validar el proceso de desarrollo e implementación de los inductores, los cuales son una herramienta fundamental para la aplicación, ya que el éxito del proceso radica en el éxito de la funcionalidad de este, es decir que tenga la capacidad de producir una capa efectiva de temple en el componente, bajo especificaciones.

El proceso actual de desarrollo de los inductores contempla métodos de fabricación casi artesanales, como lo son la unión de piezas maquinadas de cobre mediante soldadura hasta lograr las complejas geometrías propias de estos, en este sentido se pretende adoptar el uso de la impresión 3D en su fabricación a fin de innovar y ofrecer las ventajas propias de esta tecnología.

Además de la manufactura aditiva, la metodología contempla la adopción de la simulación de tratamiento térmico por elemento finito en el proceso, como herramienta para predecir el comportamiento del fenómeno de inducción en cada aplicación.

Por lo anterior es imperativo el uso de una metodología que permita validar el complejo proceso que resulta para el desarrollo de los inductores a fin de asegurar el éxito de este, lo cual ayudará en última instancia a tener control sobre las variables que los componen.

El desarrollo del presente trabajo se divide en 5 capítulos, los cuales abarcan lo siguiente:

En el capítulo 1 se aborda la información necesaria para el conocimiento actual de la metodología, de la misma manera que se establece el objetivo que se desea alcanzar, así como el alcance que se tiene, se plantea la hipótesis y se da la razón de la realización del proyecto a través de la justificación.

El capítulo 2 se centra en establecer la información necesaria para el conocimiento de los conceptos base del desarrollo del proyecto, donde se reconocen tres temas clave:

1. Flechas de velocidad constante.
2. El tratamiento térmico por inducción electromagnética.
3. La manufactura aditiva.

Los cuales se amplían en varios conceptos para su comprensión.

En el capítulo 3 se trabaja en la documentación del desarrollo de la metodología y su composición a través de diagramas que muestran cada una de las etapas que de igual manera se detallan aclarando su importancia.

Para el capítulo 4 se establece el desarrollo de proyecto donde se muestra a través de un ejemplo cómo se trabaja con la metodología planteada en el capítulo 3 para el desarrollo de un inductor y su posterior implementación en las líneas de

producción, de igual manera es aquí donde se comienza a trabajar con un “protocolo de validación” que es el documento que ayuda a corroborar la información obtenida durante el desarrollo del proceso.

Finalmente, en el capítulo 5, se concluye con la validación a través del funcionamiento del inductor para realizar el tratamiento térmico de un componente y se trabaja con el llenado del protocolo de validas mediante un caso de estudio que se desarrolló de manera real.

La última parte del documento incluye la conclusión del proyecto, y las referencias que alimentan principalmente el capítulo 2.

## CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA

En el presente capítulo se da la introducción hacia el tratamiento térmico por inducción electromagnética y su aplicación para el temple de los componentes de las flechas de velocidad constante que por su función así lo requieran, esto mediante inductores fabricados por impresión 3D, además de la definición de los objetivos y alcances del proyecto, así como una reseña histórica del desarrollo de esta tecnología, revisando resultados y aportaciones de otros autores.

### 1.1. ANTECEDENTES

El primer fenómeno de inducción electromagnética fue observado por Michael Faraday a mediados del siglo XIX, cuando se consideró indeseable dicho efecto al provocar el calentamiento de los devanados de transformadores y motores. A su vez, la primera ocasión que se utilizó para una aplicación ocurrió en 1916 cuando se fundieron metales mediante dicho fenómeno [1].

El tratamiento térmico por inducción cobró importancia en la década de 1930, cuando se desarrollaron y utilizaron conjuntos de motor y generador de alta frecuencia para el endurecimiento por inducción de cojinetes y muñones de cigüeñal [1].

En 1941, Vaughn, Farlow y Meyer presentaron un artículo titulado "Control metalúrgico del endurecimiento por inducción" en la convención de la Sociedad Estadounidense de Metales, que proporcionó pruebas de que los elementos de aleación como el níquel y el cromo eran totalmente innecesarios para obtener la máxima dureza superficial y que podrían utilizarse aceros al carbono en lugar de aceros aleados [1].

El progreso en la investigación de los principios metalúrgicos del endurecimiento por inducción continuó, y en la 26ª reunión anual de la Sociedad Estadounidense de Metales en 1944, D.L.Marten y F.E. Wiley presentaron un artículo que

informaba sobre la investigación de la temperatura, la composición y la estructura previa sobre las características de endurecimiento por inducción del acero al carbono simple [1].

En la actualidad, el proceso de endurecimiento por inducción es ampliamente aplicado en la industria de las flechas de velocidad constante, debido a sus ventajas sobre los procesos convencionales de temple, que bajo una correcta metodología permiten obtener piezas bajo estándares de calidad.

La metodología actual para el temple de los componentes de las flechas de velocidad constante se centra en el diseño y fabricación del inductor y comprende las siguientes etapas:

- Diseño del inductor.
- Fabricación del inductor con piezas maquinadas y soldadas de cobre.
- Corrida de prototipo mediante prueba y error de parámetros.

La fabricación del inductor mediante este método se denomina como convencional.

Dicha metodología es necesaria para asegurar el éxito de fabricación y corrida de prototipo, la cual se realiza actualmente por prueba y error en base a la experiencia del personal.

## **1.2. ESTADO DEL ARTE**

La reciente adopción de la impresión 3D para la manufactura de los inductores utilizados en la inducción electromagnética ha creado una nueva rama de investigación sobre este tema, por ejemplo, en 2021 con el artículo “¿La bobina impresa en 3D funciona mejor para el temple por inducción y cómo predecir el rendimiento en función de la simulación?” [2], publicado por un grupo de ingenieros de CENOS PLATFORM, se plantea a los inductores de fabricación aditiva un escalón por encima en comparación con los de fabricación convencional, al obtener mejores resultados del tratamiento térmico, así como por la reducción del uso de parámetros, lo que se traduce en un ahorro económico,

además de obtener mayor vida útil del inductor; el artículo se centra en el análisis de las simulaciones por elemento finito para predecir los resultados definiendo los parámetros de trabajo.

En 2022 durante la conferencia europea sobre tratamientos térmicos se publicó el artículo “Mejora de la vida útil de las bobinas de temple por inducción: Un enfoque complejo basado en simulaciones numéricas e impresión 3D” [3], el cual se centra en el efecto constante de carga y descarga eléctrica a la que están expuestas las bobinas durante la inducción, y cómo es que este efecto merma su vida útil. También se plantea que a través de la optimización geométrica se prolonga su funcionalidad, por otro lado, también se comenta que la impresión 3D es utilizada para la fabricación de las nuevas geometrías que son complicadas de obtener con métodos tradicionales, y al final se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en la simulación contra los resultados reales, el cual representa un acercamiento a una validación.

Para la comprobación de los resultados del proceso de inducción se define una validación, en la cual se someten probetas templadas con este tipo de bobinas a pruebas físicas para medir sus propiedades mecánicas, un ejemplo de cómo realizar dicha evaluación es la planteada en el artículo “Una aplicación novedosa sobre los elementos impulsores del uso de la resistencia de contacto eléctrico y el coeficiente de fricción para evaluar el tratamiento térmico por inducción” [4], donde se evalúan las propiedades a través de pruebas tribológicas y comprobando la funcionalidad del proceso, con la cual se aprueba o rechaza el elemento resultante.

Dentro del artículo: “Evaluación del tratamiento superficial del acero 1045 y revenido por inducción” [5] se desarrolla una experimentación sometiendo probetas a diferentes valores de temperatura para su temple, y midiendo la dureza, resistencia a la tensión, la profundidad de capa en cada una de ellas, además de evaluar su microestructura, para poder determinar los parámetros óptimos para su aplicación, de acuerdo con los resultados.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El calentamiento por inducción es una herramienta utilizada para el tratamiento térmico de algunos componentes de las flechas de velocidad constante para mejorar sus propiedades mecánicas, dicho proceso utiliza como herramienta principal una bobina de cobre (inductor) con características específicas de acuerdo con su aplicación, para su puesta a punto se hace necesario el uso de una metodología que valide la implementación de dichos inductores.

El proceso que se utiliza actualmente implica la fabricación de los inductores por métodos convencionales de fabricación, es decir, se fabrican mediante piezas maquinadas y soldadas de cobre unidas con soldadura, y cuya implementación se basa en realizar corridas de prueba hasta obtener los parámetros que permitan obtener un tratamiento térmico acorde a los planes de control, esto sin contar con una metodología bien establecida.

En ese sentido, lo que se plantea en esta investigación es el desarrollo de una metodología para validar el proceso de implementación de los inductores y que integre la manufactura aditiva para su fabricación, además de la inclusión de simulaciones por computadora del tratamiento térmico mediante el método del elemento finito para la predicción de los resultados del temple en los componentes, que permita reducir el tiempo para la puesta a punto del proceso y con ello promover la productividad.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una metodología de validación para el proceso de implementación de inductores fabricados mediante tecnología aditiva para el tratamiento térmico de componentes de CV-Joints.

#### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Validar la propuesta de diseño de los inductores fabricados con manufactura aditiva a través de la puesta a punto del proceso.

2. Corroborar los datos obtenidos de simulación de tratamiento térmico a través de un software, comparandolos con los obtenidos en la puesta a punto del proceso.
3. Validar la calidad de la fabricación de la bobina (impresión 3D) mediante su funcionabilidad.

### 1.5. HIPÓTESIS

**SI** se desarrolla una metodología que permita guiar y validar cada etapa del proceso de implementación de un inductor para el tratamiento térmico de los componentes de las flechas de velocidad constante en las líneas de producción de una empresa metal mecánica, **ENTONCES** dicho proceso será más eficiente con menos desperdicio de tiempo en línea y menos retroalimentación para el diseño al disminuir la probabilidad de errores durante el proceso de desarrollo e implementación del inductor.

### 1.6. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de una metodología de validación para la implementación de inductores fabricados mediante manufactura aditiva pretende obtener beneficios en las siguientes áreas:

- **Producción:** Con la implementación de la metodología se pretende reducir el tiempo de paro de línea para las corridas del inductor en estatus de prototipo, con ello obtener una puesta a punto más rápida, agilizando la producción.
- **Calidad:** Con el uso de dicha metodología se desea mejorar la calidad de los inductores que se diseñan y fabrican, comprobando su funcionabilidad mediante simulaciones de elemento finito y corroborando esta información en la puesta a punto del proceso.
- **Puesta a punto del proceso:** Se pretende mejorar la puesta a punto, al contemplar dentro de la metodología la obtención de parámetros a través de simulaciones que ayudan en la primera corrida del tratamiento térmico

con estos inductores, con ello obtener resultados más cercanos a los óptimos y reducir el número de iteraciones de prueba.

- **Mantenimiento:** Con la metodología se planea establecer un plan de mantenimiento preventivo sobre los inductores, esto para realizarse en cada cambio de turno y con ello prevenir fallos prematuros del inductor que deriven en mantenimientos correctivos mayores.
- **Tiempo:** Se pretende reducir los tiempos de implementación de los inductores desde su solicitud para nuevos modelos hasta la puesta a punto, de decir, hasta que el inductor este apto para comenzar con la producción.
- **Costo:** Se desea reducir los costos que implica el desarrollo de los inductores, respecto al ahorro de tiempo de diseño y fabricación, así como para las pruebas en líneas y los desperdicios de piezas para la prueba del tratamiento térmico.

### 1.7. ALCANCE

El Presente proyecto contempla la implementación de una metodología de validación a aplicarse en una empresa metal metálica, enfocada en la producción de flechas de velocidad constante, estas son un ensamble mecánico de varios elementos, algunos de estos requieren un tratamiento térmico para su correcto funcionamiento, como lo son la junta fija, junta deslizante, semieje y pistas internas.

Tanto la junta fija como la junta deslizante deben tratarse térmicamente en dos zonas, las cuales son donde se presenta el mayor desgaste en la aplicación, por lo que es necesario el desarrollo de dos inductores geoméricamente distintos para cada uno de estos elementos, estas zonas se denominan vástago y guías, más adelante se detalla de mejor manera dichas zonas.

Para los semiejes y pistas internas, en contraste, solo requieren un inductor para lograr el tratamiento térmico.

El alcance de este proyecto, entonces, se enfoca en el desarrollo de una metodología de validación del proceso de implementación para los inductores, con los cuales se logra el tratamiento térmico en la zona de las guías de la junta fija.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los conceptos técnicos que ayudarán a comprender el desarrollo del proyecto, definiéndolos de manera general, se comienza con las flechas de velocidad constante, en cuyos componentes se pretende aplicar el temple, más adelante se define el mismo tratamiento térmico, particularmente cuando se emplea la inducción electromagnética como herramienta para el calentamiento, para finalmente abordar el tema de la impresión 3D para metales, especialmente de cobre, que es la materia prima empleada en la aplicación.

### 2.1. Flechas de velocidad constante

Las Flechas de Velocidad Constante (en inglés CV-Joint) son un sistema integral, adaptado para transmitir el torque entregado por la caja de velocidades a las ruedas del automóvil, la figura 2.1 muestra la disposición que tiene este componente en el vehículo, su finalidad es asegurar un giro uniforme de la llanta a pesar de los movimientos de las ruedas, debido al efecto de la dirección del vehículo y los movimientos de la suspensión provocados por las irregularidades del camino [6].

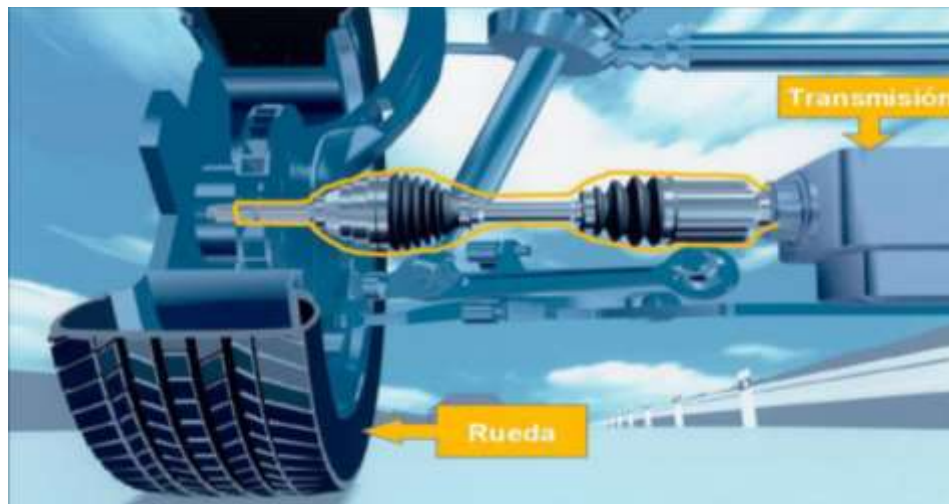


Figura 2.1 Ubicación de la CV Joint en el automóvil.

Para los automóviles de tracción delantera, cada rueda dispone una CV Joint compuesta de dos juntas homocinéticas dispuestas en sus extremos y unidas por un semieje como muestra la figura 2.2. La del lado de la transmisión se denomina *Junta Deslizante*, y permite la rotación bajo desplazamiento axial completamente uniforme, independiente del ángulo de flexión y de la posición de la junta. La del lado de la rueda denominada *Junta Fija*, solo permite el giro manteniendo la posición fija de la junta respecto a la rueda [6].

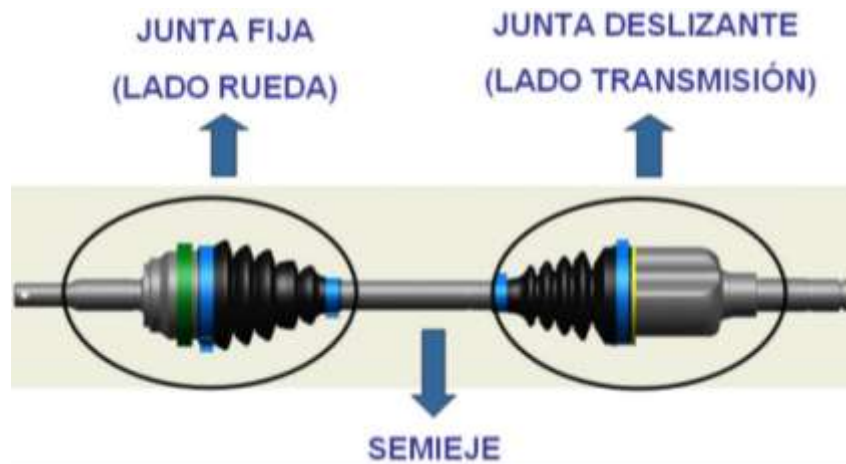


Figura 2.2 Ensamble de una CV Joint.

Las CV-Joint, a su vez están conformadas de varios elementos, los cuales se muestran en la figura 2.3:

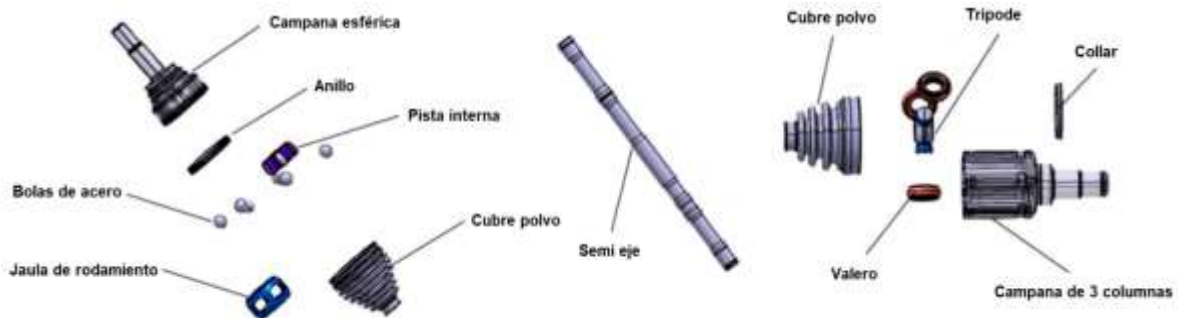


Figura 2.3 Vista explosionada de una CV.Joint.

Debido a la aplicación de las CV-Joint, es necesario que a algunos de sus componentes metálicos se les aplique un tratamiento térmico para obtener las propiedades mecánicas deseadas, aumentando su dureza y resistencia al desgaste [6], estos componentes específicamente son:

- Campana esférica (Junta fija)
- Pista interna
- Campana de tres columnas
- Semieje

## 2.2. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico de metales es el proceso mediante el cual se calientan y enfrían, de manera prescrita, para obtener condiciones y/o propiedades específicas. Casi todos los metales y sus aleaciones responden a algún tipo de tratamiento térmico. Si bien casi cualquier metal puro o aleación se puede ablandar por medio de un ciclo de calentamiento y enfriamiento adecuado solo ciertas aleaciones pueden fortalecerse o endurecerse mediante este [1].

### Hierro y acero

Fundamentalmente, todos los aceros son aleaciones de hierro y carbono con este último como elemento principal. La cantidad de carbono presente en el acero tiene un efecto pronunciado en sus propiedades y en la selección de tratamientos térmicos adecuados para producir las propiedades deseadas [7].

En todos los aceros al carbono están presentes pequeñas cantidades de elementos de aleación o elementos residuales como níquel, cromo y molibdeno. Estos elementos residuales son inevitables porque se retienen de las materias primas utilizadas en la fundición. Sin embargo, por regla general, las pequeñas cantidades de estos elementos tienen poca o ninguna desventaja para el uso previsto [7].

La Tabla 2.1 muestra los tipos de acero aleados al carbono de acuerdo con sus porcentajes de elementos aproximados en base a la norma AISI:

Los aceros al carbono simples se dividen en tres grupos según el contenido de este último.

Grupo I—Bajo Carbono (0.08 a 0.25% Carbono).

Grupo II—Carbono medio (0.30 a 0.55% de Carbono).

Grupo III—Alto Carbono (0.60 a 0.95% Carbono).

Tabla 2.1 Clasificación de aleaciones de carbono y acero.

| Designación AISI                                                                                                     | Descripción C | Composición, % |           |           |           |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|                                                                                                                      |               | Mn             | Cr        | Mo        | Ni        | Va         |
| Aceros al carbón                                                                                                     |               |                |           |           |           |            |
| 10xx                                                                                                                 | xx            | 0.30–1.50      | ...       | ...       | ...       | ...        |
| 11xx                                                                                                                 | xx            | 1.30–1.65      | ...       | ...       | ...       | ...        |
| 15xx                                                                                                                 | xx            | 1.25–1.75      | ...       | ...       | ...       | ...        |
| Aceros aleados                                                                                                       |               |                |           |           |           |            |
| 41xx                                                                                                                 | xx            | 0.40–1.00      | 0.80–1.10 | 0.15–0.25 | ...       | ...        |
| 43xx                                                                                                                 | xx            | 0.45–0.80      | 0.40–0.90 | 0.20–0.30 | 1.65–2.00 | ...        |
| 52100                                                                                                                | 0.98–1.10     | 0.25–0.45      | 1.30–1.60 | ...       | ...       | ...        |
| 6150                                                                                                                 | 0.48–0.53     | 0.70–0.90      | 0.80–1.10 | ...       | ...       | 0.015 min. |
| Aceros H                                                                                                             |               |                |           |           |           |            |
| 4150H                                                                                                                | 0.65–1.10     | 0.65–1.10      | 0.75–1.20 | 0.15–0.25 | ...       | ...        |
| Aceros al Boro                                                                                                       |               |                |           |           |           |            |
| 10Bxx                                                                                                                | xx            | ...            | ...       | ...       | ...       | ...        |
| 15B35                                                                                                                | 0.31–0.39     | 0.70–1.20      | ...       | ...       | ...       | ...        |
| Aceros inoxidables                                                                                                   |               |                |           |           |           |            |
| 416                                                                                                                  | 0.15 max      | 1.25 max       | 12.0–14.0 | ...       | ...       | ...        |
| 420                                                                                                                  | Over 0.15     | 1.00 max       | 12.0–14.0 | ...       | ...       | ...        |
| 440C                                                                                                                 | 0.96–1.20     | 1.00 max       | 16.0–18.0 | 0.75 max  | ...       | ...        |
| Las xx en los dos últimos dígitos representan el contenido de carbono en peso. El acero 1045 tiene 0.45% de carbono. |               |                |           |           |           |            |

## Fases de Hierro-Carbono

Una fase es una parte de una aleación, física, química o cristalográficamente homogénea en su totalidad, que está separada del resto de la aleación por distintas superficies límite [7]. Las siguientes fases ocurren en las aleaciones de hierro y carbono:

- Aleación fundida
- Austenita

- Ferrita
- Cementita
- Grafito

No todos los constituyentes, como la perlita y la bainita, son fases más bien son mezclas de fases y no homogéneas en su totalidad.

Un diagrama de fase es una representación gráfica de la temperatura de equilibrio y los límites de composición de los campos de fase y las reacciones de fase en un sistema de aleación. La figura 2.4 muestra el diagrama de fases de hierro-carbono del acero [7].

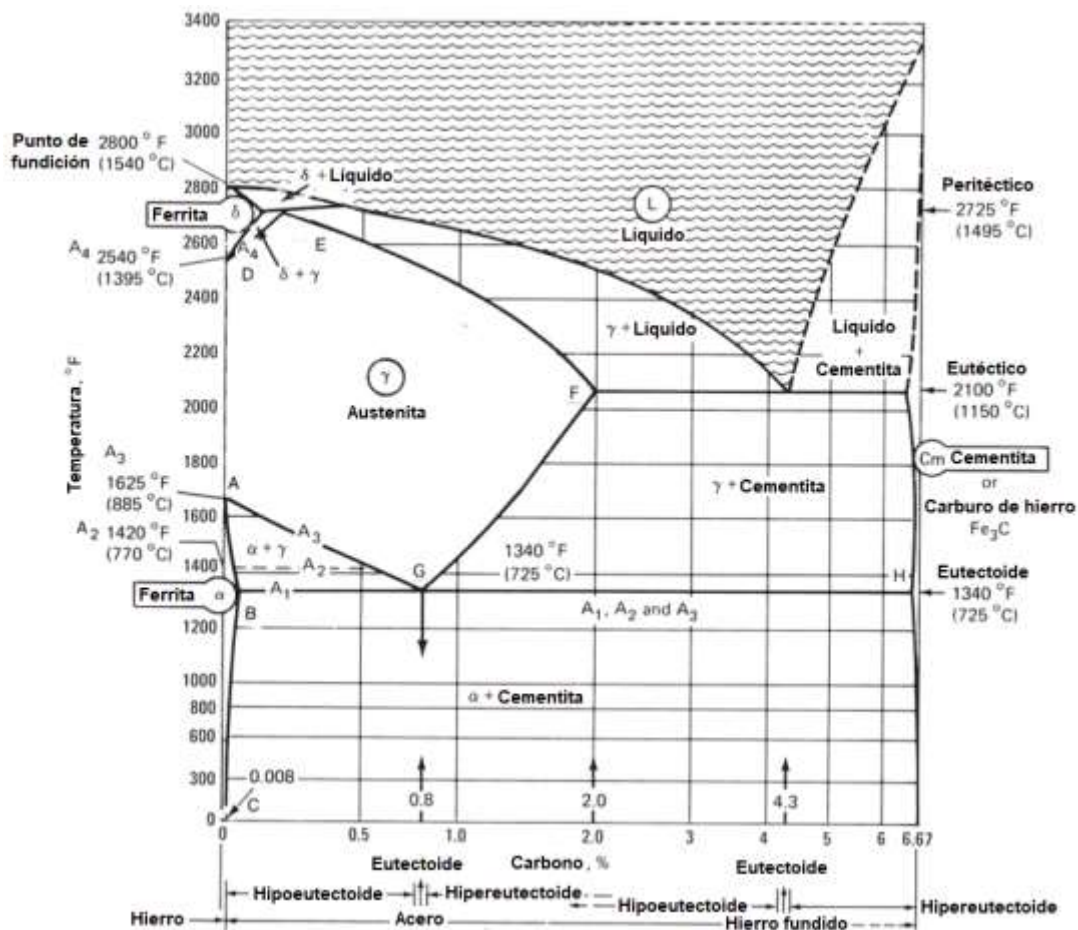


Figura 2.4 Diagrama hierro-carbono del acero.

Los diagramas de fase tienen la temperatura trazada verticalmente y la composición (porcentaje de carbono en hierro), horizontalmente. El lado izquierdo

del diagrama es 100% hierro. Las fases, como se muestra, consideran que el tiempo no es un factor y que las fases existen a la temperatura que se muestra.

El proceso por el cual el hierro cambia de una disposición atómica a otra cuando se calienta o se enfría se llama transformación. Las transformaciones que ocurren a velocidades muy lentas de calentamiento y enfriamiento se conocen como transformaciones de equilibrio. El hierro ferrítico aleado con carbono se transforma en hierro austenítico por encima de la temperatura de transformación superior. Es esta transformación la que hace posible la variedad de propiedades que se pueden lograr con un alto grado de reproducibilidad mediante el uso de tratamientos térmicos cuidadosamente seleccionados [8].

### **Austenización**

Se define como el proceso de formación de austenita por calentamiento del acero por encima del rango de transformación [9]. Las piezas de trabajo que se van a temprar por inducción se austenizan primero.

Tres factores metalúrgicos afectan las temperaturas de transformación para la austenización con calentamiento por inducción:

1. La composición química
2. La microestructura previa
3. La velocidad de calentamiento

Cuando la microestructura anterior no tiene una distribución uniforme de fases o elementos, la austenización completa requiere más tiempo a la temperatura, o una temperatura de austenización más alta [9].

### **Templabilidad**

Se refiere a la capacidad de un acero para endurecerse a un rango especificado a profundidades dadas. Se dice que los aceros de temple profundo, como los aceros aleados, tienen una alta templabilidad [9].

El carbono es la clave para el endurecimiento de los aceros mediante el mecanismo de calentamiento y enfriamiento rápido (templado). El contenido de

carbono de un acero determina la dureza máxima alcanzable. El efecto del carbono sobre la dureza alcanzable se demuestra en la Fig. 2.5. La dureza máxima alcanzable requiere solo alrededor de 0.60% de carbono [9].

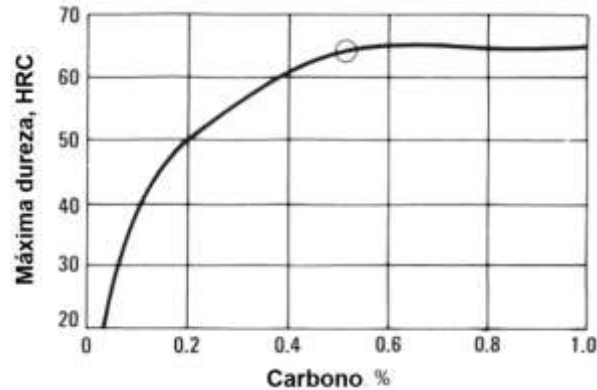


Figura 2.5 Relación entre el contenido de carbono y la dureza.

### Quenching

Es el enfriamiento rápido de un acero o aleación desde la temperatura de austenización a través del contacto con un medio de enfriamiento. El tratamiento térmico por inducción utiliza inmersión en un tanque de enfriamiento, enfriamiento por rociado o enfriamiento masivo. Los medios de enfriamiento más comunes incluyen agua, soluciones de agua, polímeros y aceites [10].

### Microestructuras producidas durante el enfriamiento.

Los productos formados durante el enfriamiento de la austenita se denominan productos de transformación. Los productos que se forman dependen de la aleación de acero utilizada y de la velocidad de enfriamiento. La martensita es la microestructura normalmente deseada para propiedades mecánicas óptimas. Los demás productos de transformación se consideran no deseables [11].

### Martensita

Es un producto de transformación formado espontáneamente por el enfriamiento rápido de una aleación de acero más allá de aproximadamente 275 °C (530 °F). Un cristal de martensita está formado por un mecanismo que puede pensarse en términos de cizalla que mueve los átomos de hierro cooperativamente y casi

simultáneamente desde sus sitios originales en la estructura de austenita hasta el sitio disponible más cercano en la estructura final [12].

Las placas de martensita tienen un contorno acicular o similar a una aguja cuando se observan con un microscopio. La transformación a martensita va acompañada de un marcado aumento de volumen. El final de la transformación a menudo se define arbitrariamente por una transformación del 90% o del 95% [12].

Una vez enfriada y grabada, la apariencia es la de una matriz blanca que solo mostrará inclusiones de óxido o sulfuro. La figura 2.6 muestra un ejemplo de paquetes de martensita [12].

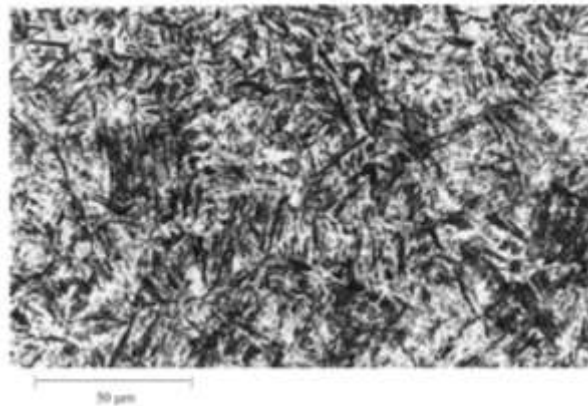


Figura 2.6 Microfotografía de estructura martensítica 500x.

### **Dureza**

Existen varios métodos para medir o evaluar los resultados de las propiedades físicas producidas como resultado del tratamiento térmico, como pruebas de tensión, pruebas de impacto, pruebas de flexión y varios tipos de pruebas de corte [11].

Sin embargo, la mayoría de estas pruebas requieren equipo especial y la destrucción de la parte que se está evaluando, y las pruebas no se pueden realizar rápidamente en línea. Por ello, la prueba de dureza es el método más utilizado universalmente para medir la conformidad con las especificaciones para el tratamiento térmico ya que correlaciona las propiedades físicas, cuando se prueban con precisión y se interpretan correctamente [11].

La definición más aceptada para la dureza es: "la capacidad relativa de una sustancia para rayar a otra". Las escalas de medición más utilizadas son: de microdureza Brinell, Rockwell, Vickers, todos estos probadores dependen del principio de indentación para la medición. En la práctica, las pruebas de dureza con tratamiento térmico por inducción utilizan probadores de dureza Rockwell, Vickers, siendo la escala de prueba Rockwell "C" la más utilizada [11].

### Tamaño de grano

El tamaño de grano se refiere al número de granos por unidad de área en términos de diámetro promedio. Este puede ser importante tanto antes como después del endurecimiento por inducción de una pieza [12].

El tamaño de grano antes del endurecimiento influye en la templabilidad de un material. Sus requisitos después del endurecimiento por inducción son importantes si existen especificaciones sobre el tamaño de grano martensítico después del enfriamiento rápido [12].

Si bien se pueden emplear varios procedimientos diferentes para medir el tamaño de grano, uno de los métodos más comunes es la comparación con gráficos estándar. El gráfico estándar permite ver las piezas a 100× y compararlas con los gráficos u objetivos calibrados para determinar el tamaño de grano, como se ilustra en la figura 2.7 [12].

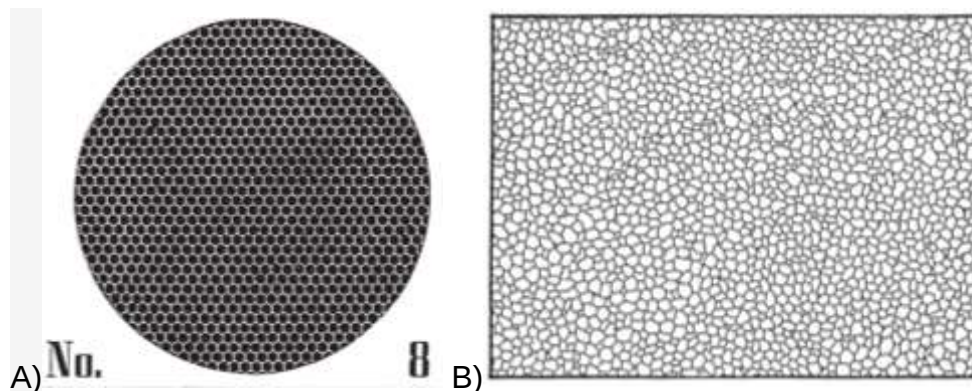


Figura 2.7 Muestra de tamaño de grano No. 8, A) Red hexagonal idealizada para tamaño medio de grano No. 8, escala ASTM, B) Granos reales obtenidos de una muestra.

### 2.3. Tratamiento térmico por inducción

El calentamiento por inducción tiene la capacidad de calentar rápidamente áreas específicas de una pieza, como los dientes de un engranaje o el área de apoyo de un eje. No solo se pueden producir propiedades mecánicas superiores en dicha área, sino que además no es necesario calentar toda la pieza como se hace con el tratamiento térmico en horno [1].

El uso de este método produce importantes beneficios, tales como:

- ✓ **Propiedades mecánicas superiores:** Al formar una cascara dura y un núcleo blando, los cuales proporcionan una buena combinación de resistencia y tenacidad imposible de lograr con el calentamiento en horno. Además, debido a que la dureza de los aceros templados depende únicamente del contenido de carbono, se pueden usar aceros al carbono en lugar de aceros aleados para la mayoría de las aplicaciones.
- ✓ **Reducción de costos de fabricación:** Los costos totales de energía se pueden reducir al no ser necesario calentar toda la pieza, y al reducir la distorsión de esta se minimiza la necesidad de esmerilado y acabado para obtener la forma neta final.
- ✓ **Compatibilidad de fabricación:** Los sistemas de tratamiento térmico por inducción se pueden automatizar para requisitos de alta producción y se pueden integrar a líneas de producción. Se reducen los requisitos de espacio en el piso y se mejora el entorno operativo del lugar de trabajo.

#### Principio de funcionamiento

El calentamiento por inducción ocurre cuando se produce un fuerte campo de fuerza electromagnético a partir de una bobina de inducción alimentada por una corriente eléctrica a una frecuencia y un nivel de potencia específicos, lo suficientemente cerca de una pieza como para producir una corriente eléctrica en esta. La pieza se calienta principalmente debido a la resistencia del flujo de esta corriente eléctrica [13].

El calentamiento real es una función compleja relacionada con la relación entre las propiedades físicas y eléctricas de la pieza a medida que se calienta a través del aumento de las temperaturas. Estas funciones incluyen las propiedades de la transferencia de calor, como la conductividad térmica y el calor específico, además de las propiedades eléctricas y magnéticas, como la resistividad, la permeabilidad y la frecuencia [13].

El proceso implica calentar una pieza de trabajo desde la temperatura ambiente hasta una temperatura por encima de su temperatura de transformación, seguido de un enfriamiento controlado. En este método no se requiere contacto entre la pieza de trabajo y la bobina de inducción como fuente de calor y el calor se restringe a áreas localizadas o zonas superficiales adyacentes a la bobina [14].

### **Resistencia eléctrica**

Todos los metales conducen la electricidad al mismo tiempo que ofrecen resistencia al flujo de esta. Esta resistencia provoca una pérdida de potencia que se manifiesta en forma de calor. Esto se debe a que, según la ley de conservación de la energía, la energía no se pierde, sino que se transforma de una forma a otra [13].

Las pérdidas producidas por resistencia se basan en la fórmula básica:

$$P = i^2 R \quad (2.1)$$

Donde  $P$  es la potencia eléctrica,  $i$  es la cantidad de corriente y  $R$  es la resistencia del material.

Debido a que la cantidad de pérdida es proporcional al cuadrado de la corriente, duplicar la corriente aumenta significativamente la pérdida (o el calor) producido. Algunos metales, como la plata o el cobre, tienen muy baja resistencia y en consecuencia son muy buenos conductores. Otros metales como el acero tienen una alta resistencia por lo que cuando pasa una corriente eléctrica a través de este, se produce una cantidad considerable de calor [13].

### Corriente alterna y electromagnetismo

Los transformadores se utilizan para proporcionar corriente eléctrica alterna a una bobina eléctrica de inducción (inductor). La bobina de inducción se convierte en la fuente eléctrica que induce una corriente en la pieza metálica que se va a calentar (pieza de trabajo) [13].

La corriente alterna (CA) en una bobina de inducción tiene un campo de fuerza invisible (electromagnético o flujo) a su alrededor. Cuando la bobina de inducción se coloca junto a una pieza de trabajo, se induce una corriente eléctrica igual y opuesta en la pieza de trabajo, y esta se calienta debido a la resistencia al flujo de esta corriente eléctrica inducida [14].

La bobina de inducción en realidad funciona como el primario del transformador, y la pieza de trabajo que se va a calentar se convierte en el secundario del transformador [14].

La figura 2.8 muestra el efecto de inducción con campos magnéticos y corrientes inducidas producidas por varios tipos de bobinas.

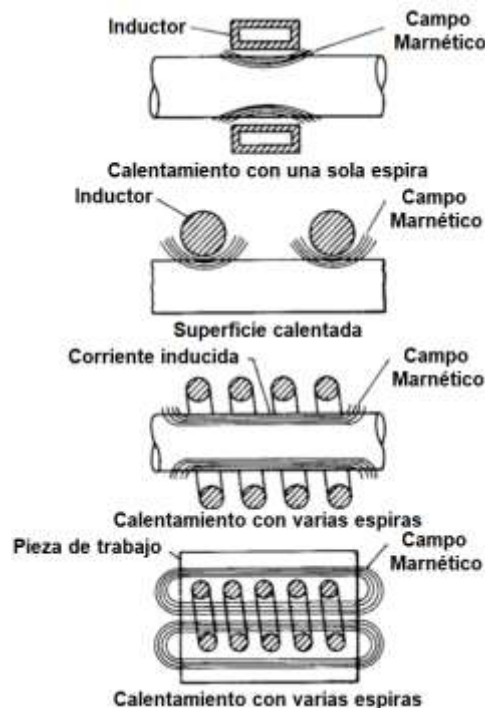


Figura 2.8 Campo electromagnético producido por inductor sobre una pieza de trabajo.

## Histéresis

Dado que las piezas magnéticas, como las fabricadas con acero al carbono, se calientan por inducción desde la temperatura ambiente, el campo de flujo magnético alterno hace que los dipolos magnéticos del material oscilen a medida que los polos magnéticos cambian su orientación polar en cada ciclo [14].

Esta oscilación se llama histéresis y produce una cantidad menor de calor debido a la fricción que se produce cuando los dipolos oscilan. Cuando los aceros se calientan por encima de la temperatura de Curie, se vuelven no magnéticos y cesa la histéresis [14].

Las pérdidas por histéresis ocurren solo en materiales magnéticos como el acero, el níquel y algunos otros metales [14]. La figura 2.9 muestra una ilustración de la histéresis y el efecto sobre la intensidad del campo de flujo magnético.



Figura 2.9 Efecto de la histéresis en la velocidad de calentamiento. N: norte; S: sur, en un material ferromagnético.

**Efecto de piel y profundidad de capa**

El calentamiento por inducción se produce cuando se induce una corriente eléctrica (corriente de Eddy) en una pieza de trabajo que es un mal conductor de la electricidad. Para que el proceso de calentamiento por inducción sea eficiente y práctico, se deben satisfacer ciertas relaciones entre la frecuencia del campo electromagnético que produce las corrientes parásitas y las propiedades de la pieza de trabajo [14].

La naturaleza básica del calentamiento por inducción es que las corrientes de Eddy se producen en el exterior de la pieza de trabajo en lo que a menudo se denomina calentamiento por “efecto pelicular”. Debido a que casi todo el calor se produce en la superficie, las corrientes de Eddy que fluyen en una pieza de trabajo cilíndrica serán más intensas en la superficie exterior, mientras que las corrientes en el centro son insignificantes. La profundidad del calentamiento depende de la frecuencia del campo de la AC, la resistividad eléctrica y la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo [14].

Para una frecuencia fija, la profundidad de referencia varía con la temperatura porque la resistividad de los conductores varía con la temperatura. Con los aceros, la permeabilidad magnética varía con la temperatura, disminuyendo a un valor de 1 (lo mismo que el espacio libre) a la temperatura de Curie, a la que el acero se vuelve no magnético. Otro resultado muy importante del efecto piel se evidencia en la eficiencia del calentamiento. La eficiencia de calentamiento es el porcentaje de la energía que pasa a través de la bobina que se transfiere a la pieza de trabajo por inducción [14].

**Densidad de potencia**

La selección de potencia es tan importante como la selección de frecuencia. Cuando se va a realizar el endurecimiento superficial, los ciclos de calor cortos que son necesarios requieren una mayor densidad de potencia (entrada de energía por unidad de superficie) que las aplicaciones de calentamiento total [14].

La densidad de potencia en la bobina de inducción es la potencia de salida media dividida por la cantidad de superficie de la pieza de trabajo dentro de la bobina de inducción y se expresa en kW/cm<sup>2</sup> o kW/in.<sup>2</sup>.

Los requisitos de energía están relacionados con la cantidad de energía requerida para calentar una pieza de trabajo y con las pérdidas de energía del sistema de calentamiento por inducción. El contenido de energía o calor requerido para calentar la pieza de trabajo se puede calcular cuando se conocen el material, su calor específico y el peso efectivo del material a calentar por hora [14].

El valor en kilovatios-hora es:

$$\frac{Kv}{hr} = \frac{\frac{lb}{h} \times \text{calor específico} \times \Delta \text{temperatura}}{3413} \quad (2.2)$$

Donde las libras por hora se relacionan con  $\frac{3600s \times \text{Peso parcial}}{\text{ciclo de calor real}}$ . La entrada de calor necesaria para calentar una pieza de trabajo específica representa solo la energía o potencia que debe inducirse desde la bobina a la pieza de trabajo [14].

### Conducción de calor

El mecanismo principal del flujo de calor hacia el interior de una pieza de trabajo proviene de la conducción del calor producido primero por las corrientes de Eddy en la superficie. La histéresis produce un efecto secundario y es un pequeño segundo productor de calor. Las pérdidas debidas a la histéresis generalmente se ignoran en los cálculos de contenido de calor para el procesamiento de inducción debido a que el efecto es mínimo [15].

Como se mencionó anteriormente, la tasa de calentamiento se ve afectada principalmente por:

- Intensidad de campo del flujo magnético.
- Acoplamiento de la bobina de inducción a la pieza de trabajo.
- Las propiedades eléctricas y magnéticas del material que se está calentando.

La tasa deseada de calentamiento varía con la aplicación. El análisis matemático de la transferencia de calor puede ser bastante complejo debido a la interacción del calor intenso producido por el calentamiento de la superficie por corrientes de Eddy, la tasa de transferencia de calor hacia el núcleo y el hecho de que la energía eléctrica, térmica y las propiedades metalúrgicas de la mayoría de los materiales muestran una fuerte dependencia de la temperatura y varían durante el ciclo de calentamiento [15].

La transferencia de calor es una cuestión de diferencia de temperatura y la tasa de conducción térmica de la pieza de trabajo. Cuando el material es austenítico, se necesita un mayor diferencial de temperatura en la superficie para aumentar la velocidad de conducción y transferencia de calor hacia el núcleo. Tan pronto como se apaga la energía, el aumento de temperatura parece detenerse en el borde del área austenitizada [15].

### **Sistemas de tratamiento térmico por inducción**

El tratamiento térmico por inducción electromagnética se define como una herramienta utilizada para lograr el temple en materiales ferrosos (componentes de flechas de velocidad constante) obteniendo las propiedades mecánicas deseadas para su aplicación, el cual tiene como elemento principal una bobina de cobre denominada inductor [16].

Los elementos que componen un sistema de tratamiento térmico por inducción se muestran en la Figura 2.10.

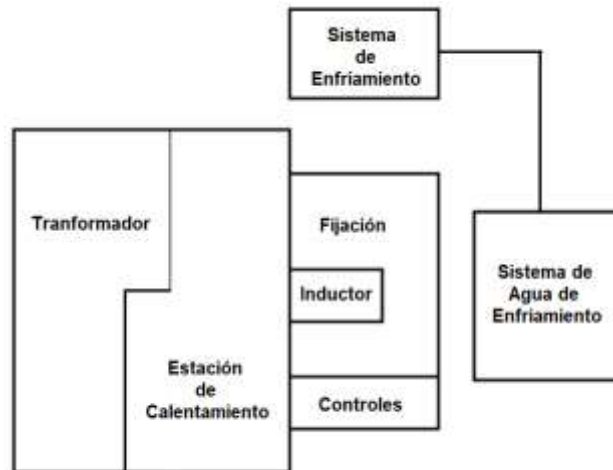


Figura 2.10 Elementos de un sistema de tratamiento térmico por inducción.

Estos elementos son:

- Refrigerante, para enfriar los componentes eléctricos.
- Fuente de potencia.
- Estación de calentamiento.
- Dispositivo de fijación.
- Controles.
- Inductor.
- Sistema de enfriamiento.

Dependiendo de la fuente de alimentación y los requisitos de proceso, estos elementos pueden suministrarse por separado o en unidades. La fuente de alimentación es el componente que recibe la alimentación de línea de la red pública y la convierte en una salida de alta frecuencia [16].

## 2.4. Bobinas de inducción

La bobina, también conocida como inductor o bobina de trabajo de inducción, es básicamente un primario de transformador que induce una salida de alta frecuencia de una fuente de alimentación de inducción en una pieza de trabajo, que es efectivamente el secundario del transformador [17].

El diseño de la bobina es específico de la aplicación, por lo que se debe seleccionar el tipo de bobina que se utilizará antes de diseñar el accesorio. El tipo de proceso utilizado, por ejemplo, si las piezas de trabajo se calientan de una sola vez o se escanean, influye en la selección de la bobina [17].

### **Clasificaciones de bobinas por campo electromagnético**

Las dos clasificaciones de bobina se relacionan con la dirección de las corrientes parásitas producidas por la bobina en la pieza de trabajo: flujo longitudinal y flujo transversal.

**Las bobinas de inducción de flujo longitudinal** (flujo de corriente inversa) son, con mucho, el tipo de bobina más utilizado, en este la pieza de trabajo está rodeada o envuelta con espiras en lados opuestos para que la corriente inducida fluya alrededor de la pieza de trabajo [17].

La figura 2.11 ilustra el confinamiento del campo de flujo entre dos conductores con corriente opuesta. Las bobinas de solenoide vienen en muchas formas y adaptaciones diferentes, siendo la bobina circular o envolvente la forma más simple.

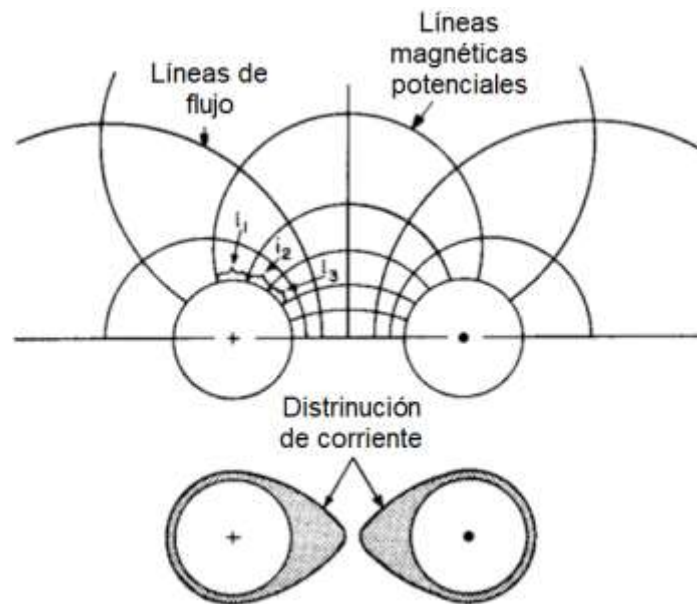


Figura 2.11 Diagrama de flujo de dos conductores paralelos que transportan corriente en direcciones opuestas.

**Las bobinas de flujo transversal** (a veces llamadas de proximidad) no se usan tan ampliamente. Se utilizan para calentar piezas de trabajo donde el espesor de la sección transversal es inferior a cuatro veces la profundidad de referencia.

La figura 2.12 muestra un ejemplo de bobina transversal. La pieza de trabajo se coloca esencialmente entre espiras de la bobina de inducción, en las que la corriente fluye en la misma dirección. Al hacer esto, no hay efecto de cancelación actual y las piezas delgadas se pueden calentar de manera eficiente [17].

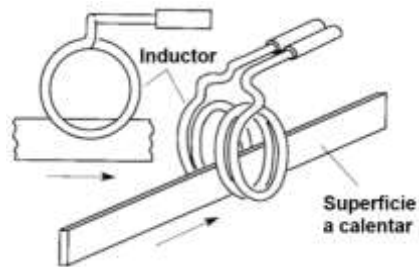


Figura 2.12 Diagrama de aplicación de bobina transversal.

### **Inductores para calentamiento estático (SingleShot)**

El calentamiento estático o Single-shot se utilizan a menudo para definir el mismo tipo de ciclo de calor. Los inductores para calentamiento de Single-shot de alta intensidad están diseñados para ubicarse horizontalmente en la pieza de trabajo para que la corriente se induzca en la dirección longitudinal. Las piezas de trabajo redondas se giran a alta velocidad para que se pueda producir un campo magnético alrededor del diámetro [17].

Los inductores para calentamiento de Single-shot generalmente tienen concentradores de flujo para ayudar a mejorar a la eficiencia. La limitación de tamaño de una pieza de trabajo para el endurecimiento de este tipo está limitada por la cantidad de energía disponible en la fuente de alimentación [17].

### **Inductores para Escaneo o Endurecimiento Progresivo.**

El escaneo requiere que la pieza de trabajo se demore en su posición al comienzo del ciclo de calentamiento y luego comience a moverse a través de la bobina, calentándose y enfriándose progresivamente.

La principal diferencia en el diseño del serpentín entre el calentamiento estático y el escaneo ocurre cuando el enfriamiento está integrado en el serpentín, con cámaras separadas integradas en el serpentín para el enfriamiento y para el agua de enfriamiento del serpentín. Dependiendo de la aplicación, se utilizan bobinas tanto envolventes como longitudinales [17].

### **Consideraciones de diseño de bobinas para eficiencia y uso:**

- La bobina debe acoplarse lo más cerca posible de la pieza de trabajo.
- Los conductores a las bobinas deben estar diseñados para la mejor eficiencia.
- Las bobinas deben estar diseñadas para que sean rígidas y no se muevan cuando se les aplica energía.
- Las bobinas deben diseñarse de modo que no se sobrecalienten durante el uso y no desarrollen fracturas por tensión durante el uso. Todas las bobinas tienen pérdidas de energía significativas y necesitan un buen enfriamiento. Los sistemas de enfriamiento de alta presión separados pueden ser necesarios para aplicaciones de alta potencia.
- La bobina debe diseñarse de modo que las líneas de flujo magnético produzcan corrientes de Foucault que calienten las áreas deseadas. La concentración más alta de líneas de flujo está dentro de la bobina, produciendo allí la velocidad máxima de calentamiento.

### **Concentradores o intensificadores de flujo magnético**

Son utilizados de manera muy efectiva para aumentar la eficiencia de algunas bobinas. En otros casos, los concentradores de flujo son necesarios para producir el patrón requerido en la pieza de trabajo [17]. La figura 2.13 (a) muestra la distribución de corriente en un conductor. Cuando se coloca una pieza de trabajo debajo del conductor, la corriente se redistribuye figura 2.13 (b).

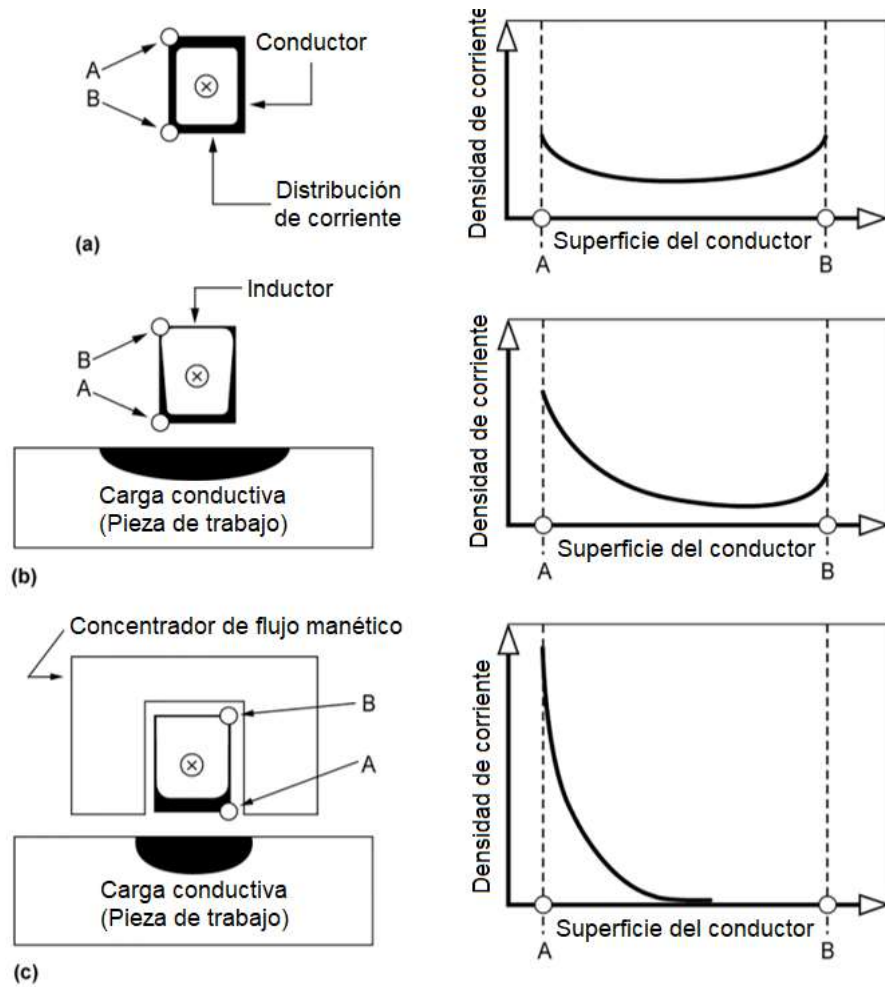


Figura 2.13 Distribución de corriente en conductor recto.

Debido al efecto de proximidad, una parte significativa de la corriente del conductor fluye cerca de la superficie del conductor que mira hacia la pieza de trabajo. El resto de la corriente se concentra en los lados del conductor, con una corriente inducida en un área general en la pieza de trabajo cercana al conductor. Después de colocar un concentrador de flujo alrededor de este conductor figura 2.13 (c), prácticamente toda la corriente del conductor se concentra en la superficie que mira hacia la pieza de trabajo [17].

Correctamente aplicados, los beneficios son:

- Reducción de los niveles de potencia operativa necesarios para obtener el calentamiento deseado de las piezas de trabajo.

- Mejora de la eficiencia del proceso y disminución de la cantidad de energía utilizada.
- Aumento de la tasa de productividad del sistema de tratamiento térmico.
- Mejora del patrón de calor debido al control de la distribución del calor en la pieza de trabajo.
- Protección de la pieza de trabajo o los componentes del accesorio contra el calentamiento no deseado por flujo perdido.
- Mejora en la adaptación de la carga de la bobina a la fuente de alimentación.

### 2.5. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (AM) abarca una gama de tecnologías, permitiendo la fabricación de componentes físicos, a partir de modelos 3D virtuales mediante la construcción del componente capa por capa hasta que la pieza está completa [18].

En comparación con los procesos de fabricación sustractiva, los cuales parten de un bloque base para formar la pieza deseada retirándole material mediante el uso de una herramienta, la fabricación aditiva comienza desde cero y construye la pieza "imprimiendo" cada nueva capa encima de la anterior, hasta que la pieza está completa como lo muestra la figura 2.14. Dependiendo de la tecnología particular utilizada, el grosor de la capa varía desde unas pocas micras hasta alrededor de 0.25 mm por capa, además de contar con una gran variedad de materiales disponibles para las diferentes tecnologías [18].



Figura 2.14 comparación entre manufactura convencional y manufactura aditiva.

La fabricación aditiva permite la creación de piezas y productos con características complejas, que no podrían haberse producido fácilmente a través de procesos de fabricación convencionales.

En la fabricación convencional, entre más compleja geométricamente se vuelve una pieza es más costosa o, hasta cierto punto, se vuelve imposible de fabricar. La AM funciona de manera opuesta, ya que entre más compleja sea la pieza, más adecuada será para AM, ya que no cuesta más producir una pieza compleja que una simple. Sin embargo, si una pieza es muy simple, AM puede convertirse en una forma costosa de producir la pieza en comparación con la fabricación tradicional [18].

ASTM International clasifica los procesos AM en siete categorías principales, según el método de adhesión y unión. Estas categorías son:

- Fotopolimerización VAT
- Inyección de material
- Extrusión de material
- Fusión de lecho de polvo
- Inyección de aglutinante
- Deposición de energía directa
- Laminación de láminas.

Una clasificación de los procesos AM ampliamente utilizada es, según el estado de la materia prima, la cual se presenta a continuación ver figura 2.15.

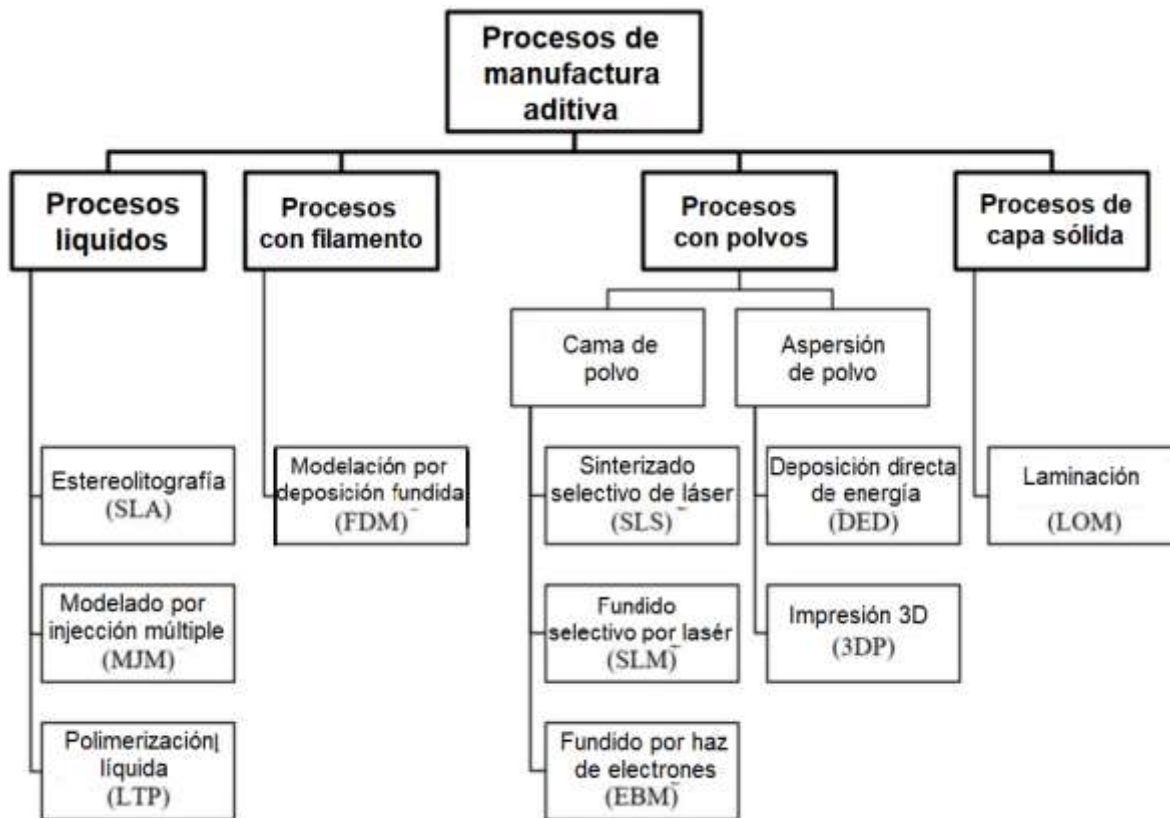


Figura 2.15 Clasificación de AM según estado de materia prima.

### Procesos de cama de polvo

En este sentido, la sinterización selectiva por láser, que es un proceso con polvos, es uno de los procesos más empleados y con mejores resultados de los mencionados en la figura 2.14.

La sinterización selectiva por láser (SLS) es un proceso AM en el que capa por capa la materia prima en forma de un polvo se distribuye uniformemente con un brazo de recubrimiento para crear una superficie nivelada y uniforme que cubre completamente el área de construcción, como se muestra en la Figura 2.16, luego, un rayo láser enfocado se dirige a la capa de polvo y escanea la sección transversal de la pieza. Se baja la plataforma de construcción y se repite el proceso hasta que se completen todas las capas [18].



## CAPÍTULO 3 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En el capítulo 3 se plantea el desarrollo de la metodología la cual utiliza técnicas y herramientas que permitan obtener la información necesaria para poder validar la totalidad del proceso de desarrollo de los inductores a través de la puesta a punto del tratamiento térmico de los componentes de las flechas de velocidad constante y marca la pauta para poder posteriormente implementarla en el proceso de producción.

Cabe mencionar que la investigación que se realiza tiene un enfoque mixto, debido a la naturaleza del proyecto, es decir, incluye la recolección de información de libros, revistas y artículos, así como de la experimentación de forma práctica dentro de la producción.

Recordando que la problemática sobre la cual se centra el desarrollo de la investigación se enfoca en la determinación de una metodología para validar el proceso de desarrollo de un inductor, misma que es necesaria para el temple de algunos de los componentes de las flechas de velocidad constante, apoyándose en el uso de simulación del tratamiento térmico, así como en la adopción de la manufactura aditiva para su fabricación.

### 3.1. Diagrama de flujo

El uso de la inducción electromagnética como herramienta para el tratamiento térmico de algunos componentes de las CV-Joints, dentro de la empresa no es reciente, ya que se ha incluido en el proceso de fabricación de estas durante ya varios años, mediante el uso de inductores de fabricación convencional. Este tipo de inductores son diseñados para fabricarse a partir de pequeñas piezas maquinadas y tubos de cobre doblado, que posteriormente se unen mediante soldadura para obtener la geometría final del inductor, un ejemplo de este se muestra en la figura 3.1, donde se pueden ver las uniones de las piezas con soldadura conformando una bobina de inducción.

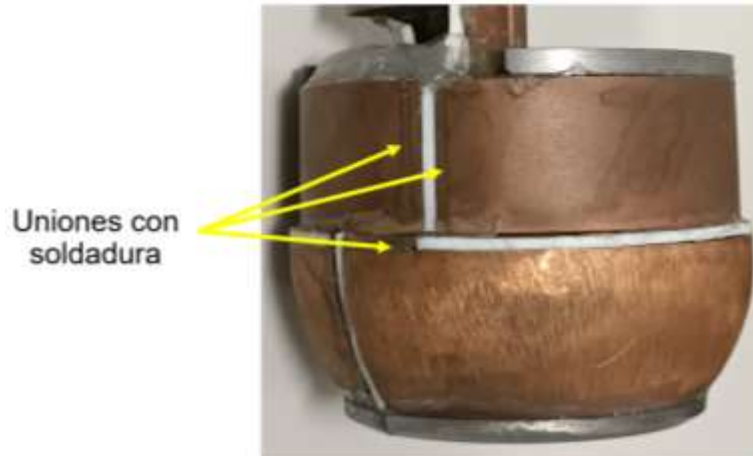


Figura 3.1 Inductor de fabricación convencional.

Actualmente, en la empresa existe un estándar de calidad en el cual se establecen las etapas necesarias para la fabricación de inductores de fabricación convencional para tratamiento térmico por inducción para las nuevas aplicaciones es decir para los nuevos modelos que se pretenden fabricar. Una aproximación de esta secuencia del método se muestra en la figura 3.2, la cual comienza con la necesidad de un inductor especial para los nuevos programas de producción, con las etapas de diseño, fabricación, pruebas en estatus de prototipo, hasta llegar a la liberación donde se ha comprobado que el inductor es apto para comenzar con la producción, lo anterior en correlación con una receta específica (valores de parámetros para el tratamiento térmico) que funcionan en la línea que se ha desarrollado la corrida del prototipo.

Es necesario mencionar que la empresa cuenta con un área destinada especialmente a la fabricación y mantenimiento de los inductores, donde es posible la fabricación total de estos, así mismo es donde se les da mantenimiento cuando sea necesario.

De igual manera existe un estándar enfocado al tratamiento térmico por inducción, en este caso enfocando la fabricación de los inductores mediante impresión 3D, la cual se pretende adoptar, este documento está basado totalmente en el trato de los inductores convencionales, diferenciándose en el modo de fabricación, la cual se desarrolla actualmente de manera externa, aun así sirve de base para la

propuesta de la nueva metodología, dicho diagrama puede observarse en la figura 3.3.

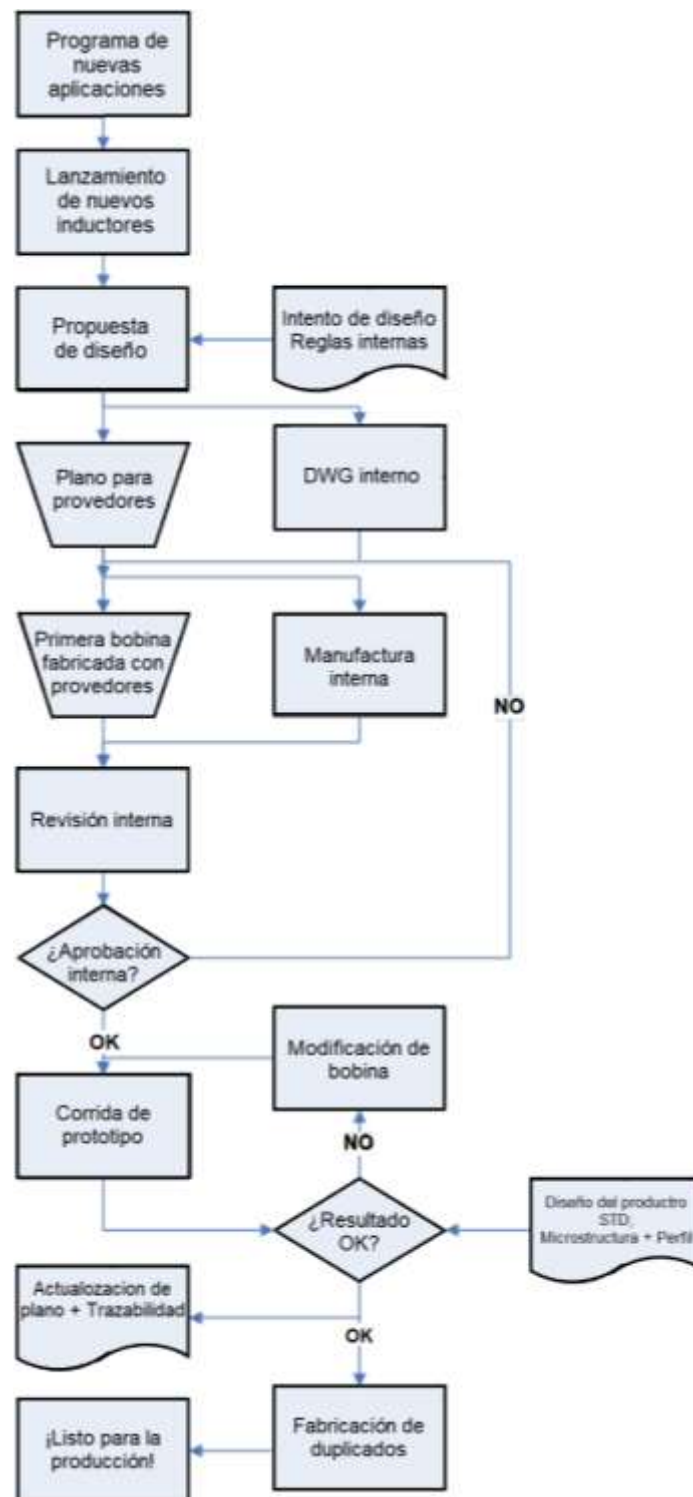


Figura 3.2 Diagrama de flujo para el trato de los inductores de fabricación tradicional.

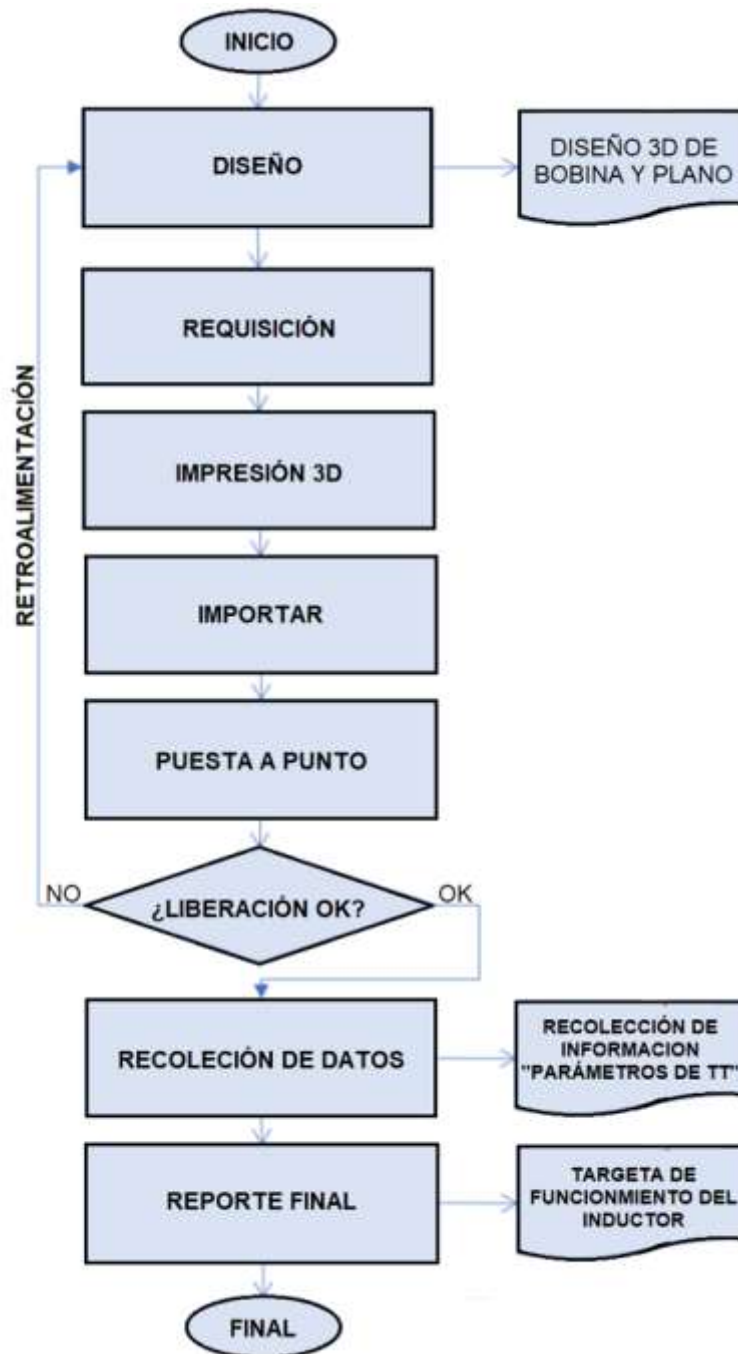


Figura 3.3 Diagrama de flujo para el trato de los inductores fabricados con manufactura aditiva. De manera general, el diagrama se puede resumir en 3 etapas muy parecidas a las que se trabajan con los inductores convencionales, las cuales son:

1. Diseño del inductor.
2. Fabricación del inductor con proveedores externos.
3. Puesta a punto por prueba y error.

Sin embargo, el uso de solo estas tres etapas causa problemas repetitivos tales como:

- Rechazo de los modelos 3D diseñados para la impresión por parte de los proveedores, esto debido a que en ocasiones es imposible imprimirlos, al ser necesario tener en consideración una serie de restricciones propias de la manufactura aditiva, como la longitud de los voladizos, ángulos entre paredes, grosores de pared, entre otros, para lograr una impresión sin defectos. Estas restricciones en ocasiones pueden ser pasadas por alto por parte de los ingenieros de diseño.
- Pérdida del tiempo en línea de producción, al no tener un punto de partida para la prueba de parámetros de funcionamiento necesarios para el tratamiento térmico en este caso para comenzar la prueba de prototipo, este proceso es realizado por prueba y error, hasta lograr los parámetros que nos otorgarán un tratamiento térmico satisfactorio, esta excesiva pérdida de tiempo se refleja como pérdida de producción.

Debido principalmente a estas problemáticas, a las tres etapas planteadas anteriormente se acopla la simulación de elemento finito para el tratamiento térmico por inducción de los componentes de las CV-Joint para con ello generar parámetros de partida para las pruebas en línea que nos ayuden a reducir el número de iteraciones necesarias para el éxito del prototipo.

Así mismo se adopta la manufactura aditiva, con las ventajas que esta representa para la fabricación de este tipo de herramentales sobre la fabricación convencional de los mismos, en conjunto con la simulación de la impresión 3D para determinar si es posible fabricarse, o en su caso dar retroalimentación a los diseñadores, con ello evitando la mayor cantidad de defectos de fabricación propios de esta tecnología.

En conjunto lo anterior abre paso a una metodología para la validación compuesta de las siguientes 5 etapas:

1. Diseño del inductor para el temple por inducción.

2. Simulación del tratamiento térmico por inducción.
3. Análisis de la factibilidad de la impresión 3D del inductor.
4. Manufactura del inductor por impresión 3D.
5. Corrida del prototipo de inductor 3D para tratamiento térmico.

Un primer diagrama representativo de dichas etapas integradas en una metodología se muestra en la figura 3.4, donde se incluye la validación de cada una de las etapas inmediatamente después de que se realiza lo cual plantea el problema de si las primeras etapas en realidad cumplirán con el objetivo de obtener un tratamiento térmico que satisfaga las necesidades del cliente:

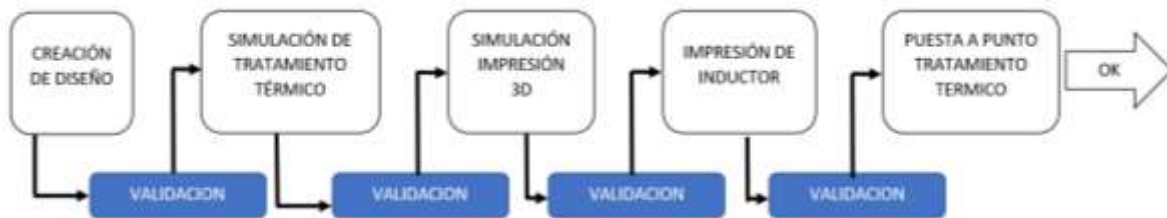


Figura 3.4 Diagrama de la metodología esperada.

Un diagrama que representa mejor la forma de trabajo que se implementa en el proyecto es el mostrado en la figura 3.5, donde el diseño del inductor es validado mediante el éxito obtenido en la puesta a punto del inductor, así como la simulación del tratamiento térmico y la impresión del inductor.

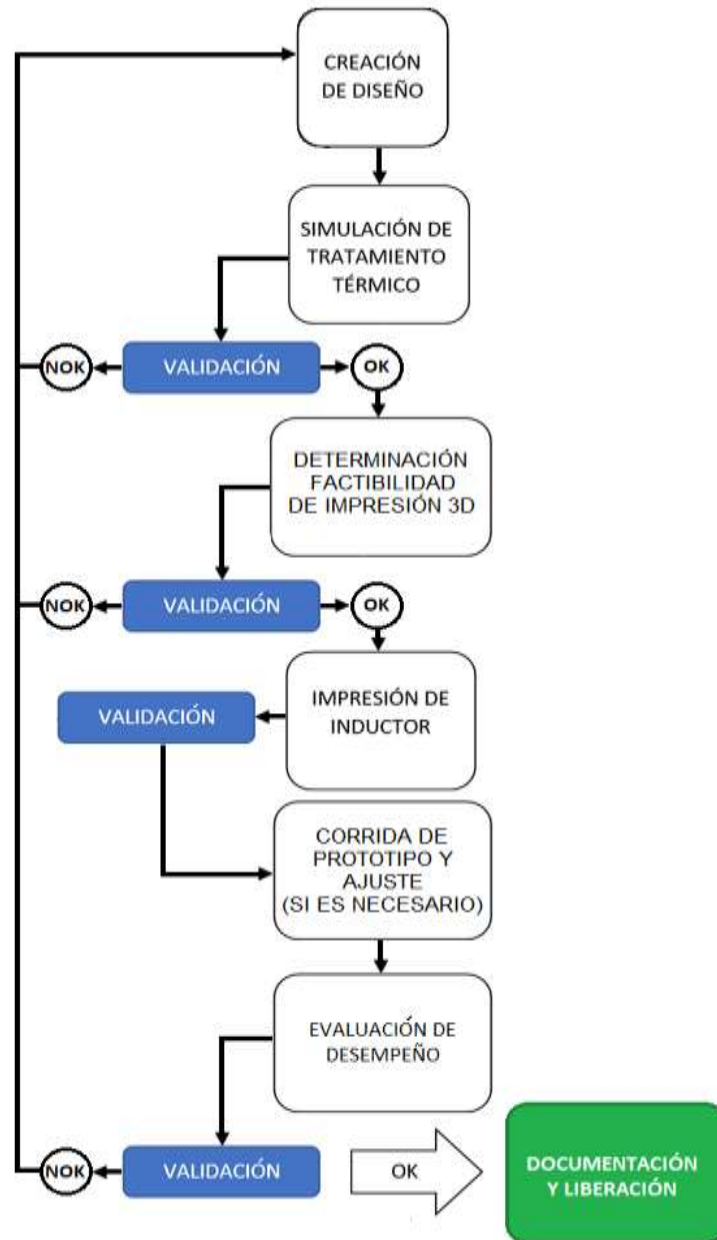


Figura 3.5 Diagrama del proceso de validación mediante la puesta a punto.

La figura 3.6 muestra las etapas que integran el proceso, exponiendo las entradas que deben proveerse y los resultados que se obtienen al finalizar cada una, posteriormente se enlistan los procesos desarrollados por etapas.

|          |                              |                                                |                                                    |                                            |                                                              |
|----------|------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| ENTRADAS | Solicitud de diseño          | Modelo CAD de pieza                            | Modelo CAD del inductor                            | Modelo CAD para impresión 3D del inductor  | Pieza a temprar                                              |
|          |                              | Modelo CAD del inductor                        |                                                    |                                            | Inductor fabricado con manufactura aditiva                   |
|          | Descripción de problemática  | Propuesta de parámetros de tratamiento térmico |                                                    |                                            | Parámetros para tratamiento térmico                          |
|          | ↓                            | ↓                                              |                                                    |                                            | ↓                                                            |
| ETAPAS   | Diseño del inductor          | Simulación de tratamiento térmico              | Análisis de factibilidad para impresión 3D         | Manufactura del inductor                   | Corrida de prototipo de inductor 3D para tratamiento térmico |
| SALIDAS  | ↓                            | ↓                                              | ↓                                                  | ↓                                          | ↓                                                            |
|          | Diseño CAD para simulaciones | Parámetros óptimos para tratamiento térmico    | Determinación de la factibilidad (SÍ-NO-¿POR QUÉ?) | Inductor fabricado con manufactura aditiva | Verificación del diseño                                      |
|          |                              |                                                |                                                    |                                            | Verificación de simulación vs realidad                       |
|          |                              |                                                |                                                    |                                            | Puesta a punto del proceso                                   |
|          |                              |                                                |                                                    |                                            | Análisis estadístico                                         |
|          |                              |                                                |                                                    |                                            | Estabilidad del proceso                                      |

Figura 3.6 Entradas y salidas de cada etapa del proceso.

### 3.2. Etapa de diseño del inductor

En la primera etapa se comienza con el diseño del inductor para el tratamiento térmico por inducción de los componentes de las CV-Joint, de acuerdo con especificaciones establecidas con clientes y con las consideraciones necesarias para poder fabricarlo mediante impresión 3D, dichas consideraciones se evalúan en etapas posteriores con la finalidad de corroborar que se cumplan.

En esta etapa es necesario la evaluación de geometría y tamaño del componente a temprar, así como las geometrías de la capa y perfil de endurecimiento que se debe lograr, ya que a partir de ello se diseña el inductor, de igual manera es momento de generar el diseño de los concentradores de flujo magnético que se encargaran de redireccionarlo hacia las zonas donde se necesita mayor cantidad de calor, para finalizar la integración del ensamble del inductor acorde a la máquina de tratamiento térmico, que también debe considerarse, en cuanto a su capacidad de suministro de energía.

El objetivo hasta aquí es obtener el diseño de un inductor con una geometría apropiada para el tratamiento térmico, listo para la etapa siguiente de simulación del tratamiento térmico y la fabricación mediante tecnología aditiva, para finalmente asegurar la obtención de la correcta capa efectiva de temple, dentro del proceso de producción.

El diseño del inductor se desarrolla mediante software de computadora, adaptándose a la necesidad en cuanto a geometría y tamaño, es decir, de acuerdo con el componente que se va a temprar con este herramental, recordando que cada inductor se fabrica especialmente para cubrir una necesidad.

La solicitud para la creación de este componente se realiza mediante especificaciones de diseño necesarias para asegurar la elaboración de diseño de acuerdo con la necesidad, considerando factores como el tipo de acero, la geometría de la pieza de trabajo, máquina de tratamiento térmico, entre otros (ver ANEXO A).

El resultado que se obtendrá será un archivo CAD del inductor, para las posteriores simulaciones y fabricación del inductor, ya que es a partir de este modelo que se imprime la bobina, en el caso de que sea aprobada en la etapa 2 y 3.

Su funcionalidad se evalúa durante la puesta a punto del proceso, que es la etapa final, ya que es en ese momento que se demuestra si es capaz o no, de conseguir el temple deseado en los componentes.

### **3.3. Etapa de simulación de elemento finito para el tratamiento térmico por inducción**

La herramienta utilizada en esta etapa es un software de elemento finito, diseñado especialmente para la simulación de tratamiento térmico por inducción electromagnética, el cual combina los efectos de campo magnético, calentamiento por inducción, transferencia de calor y transformaciones del material. El objetivo es conseguir, a través de varias iteraciones, los parámetros con los que se obtenga

virtualmente una capa efectiva de temple con las dimensiones y características deseadas.

Se emplea el modelo CAD de la pieza de trabajo, así como del inductor diseñado para la simulación del comportamiento de temple, proponiendo una serie de parámetros de acuerdo con la máquina del tratamiento térmico de la línea de producción, para obtener los parámetros (receta) aplicable en el proceso real.

La forma de evaluar es mediante la comparación de los resultados obtenidos virtualmente, en términos de dimensiones y características de la transformación contra los planes de control de las piezas.

El resultado de esta etapa será la obtención de parámetros (receta) que permita obtener una capa efectiva de temple para la aplicación real, usados para la primera iteración de la corrida del prototipo (ver ANEXO B).

#### **3.4. Etapa de determinación de la factibilidad de impresión 3D por simulación con software de elemento finito**

Para la simulación de la impresión 3D se emplea un software de elemento finito que es un programa especial para determinar el comportamiento de la impresión 3D de los componentes a partir de diseños CAD, arrojando resultados para antes y después de la simulación de impresión como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7 Diagrama del proceso simulación de la impresión 3D.

El objetivo de esta etapa es simular el proceso de la impresión 3D, y evaluar la pieza virtual obtenida contra lo diseñado, y a partir de ello determinar si es factible para imprimir, ya que existen algunas restricciones propias de este método de fabricación.

A partir del diseño generado y previamente aprobado para el tratamiento térmico, proponer la orientación y parámetros de impresión necesarios para obtener un componente fiel al diseño y con ello determinar su factibilidad de impresión.

Los resultados obtenidos a partir de la simulación se dividen en 2, los primeros son arrojados antes de concluir la simulación, y se refieren al tipo de geometría a fabricar, por ejemplo, indica la distancia que existe en voladizo y que genera soportes, lo cual representa una desventaja en los conductos internos del inductor que deben ir huecos, por lo que esta dimensión se restringe a una longitud mínima imprimible sin la necesidad de soportes, o bien voladizos con ciertos ángulos. Si bien externamente los soportes se pueden retirar, lo ideal es tener el menor número de ellos.

El segundo resultado se refiere a los efectos producidos por el tipo de fabricación, que a grandes rasgos puede entenderse como una micro-soldadura y los efectos de calentamiento y enfriamiento constante que sufre el componente con la generación de cada capa. Es posible aplicar tratamientos térmicos posteriores a la impresión para mejorar las propiedades del componente y disminuir los esfuerzos residuales que provocan las distorsiones.

La evaluación se realizará asegurando que no existan complicaciones para la posterior etapa de impresión, y buscando que se obtenga una bobina de acuerdo con lo diseñado, lo cual se expresará por escrito y con la evidencia (imágenes) de dicho proceso.

El resultado final es una factibilidad de impresión que autorice o rechace el diseño, y si es el caso especificar la razón del rechazo (Ver ANEXO C), de igual manera si es aprobada, se obtiene el inductor físicamente.

### **3.5. Etapa de corrida de prototipo de inductor 3D para tratamiento térmico**

La etapa de corrida del prototipo se realiza en la estación de tratamiento térmico en línea de producción, esto una vez que se haya obtenido la bobina impresa a partir del diseño propuesto y se haya dispuesto en la base correspondiente. En la figura 3.8 se muestra el ensamble del inductor listo para poder montarse en la máquina, en ella se pueden distinguir los siguientes elementos:

1. Bobina fabricada con impresión 3D.
2. Concentradores de flujo magnético.
3. Aislantes (evitan el arco magnético entre las espiras de la bobina).
4. Base de fijación a la máquina de inducción (contiene conductos para el fluido refrigerante de la bobina de inducción).
5. Entradas para el Quench (refrigerante de la pieza de trabajo necesario para el tratamiento térmico).



Figura 3.8 Ensamble de inductor, dispuesto para ser llevado a la máquina de temple.

El objetivo en esta etapa es obtener una puesta a punto y liberación del proceso, obteniendo una capa efectiva de temple bajo planes de control, con el inductor fabricado mediante manufactura aditiva en conjunto con los parámetros (receta) obtenidos en la simulación del tratamiento térmico.

En esta etapa se evalúa el diseño y fabricación del inductor, además de la simulación del tratamiento térmico, esto para determinar si son correctos, o en su defecto, ajustar las propuestas de la simulación y con ello asegurar una estabilidad en el proceso y poder realizar un análisis estadístico de los resultados.

La evaluación de la capa efectiva de temple se realiza a través de un análisis en un laboratorio metalográfico que, de acuerdo con los resultados obtenidos rechaza o aprueba la propuesta. Una vez que se apruebe, se documentan los parámetros utilizados en la liberación con las firmas de los responsables (ver ANEXO D), con ello se comprueba que efectivamente el inductor en conjunto con los parámetros cumple con el objetivo y con ello se puede validar el proceso.

El procedimiento que se desarrolla para la prueba y liberación del proceso se describe a continuación:

### **1. Montaje del inductor**

En este momento el inductor está en piso, ahí los operadores deben montarlo en la máquina teniendo especial cuidado de que el inductor este fijo a la base y concéntrico con la pieza y no roce en ninguna parte ya que esta rotará en su eje cuando se lleve a cabo el tratamiento, para realizar esta maniobra se apoya de una pieza patrón.

También en este momento es necesario checar fugas del refrigerante (agua destilada) que enfría el inductor internamente, cuando se hayan asegurado los puntos anteriores se podrá pasar a la siguiente etapa.

### **2. Establecer parámetros de inicio**

Una vez que se ha montado el inductor es el momento de establecer los parámetros de inicio en la máquina, estos estan especificados en la hoja de simulación de tratamiento térmico y serán los indicados para la primera iteración, si con estos no se obtiene una pieza bajo las especificaciones de plan de control se ajustarán los parámetros de acuerdo con los resultados obtenidos hasta obtener una capa efectiva de temple aceptable.

En la tabla 3.1, se muestran los parámetros de trabajo necesarios para el tratamiento térmico los cuales se modifican según la necesidad de los resultados.

Tabla 3.1 Parámetros de trabajo para tratamiento térmico.

| Parámetro                 | Unidades  | Valor |
|---------------------------|-----------|-------|
| POTENCIA                  | (%) / Kw  |       |
| FRECUENCIA                | KHz       |       |
| TIEMPO DE CALENTAMIENTO   | Seg       |       |
| TIEMPO DE ENFRIAMIENTO    | Seg       |       |
| RETARDO DE ENFRIAMIENTO   | Seg       |       |
| POSICIÓN DE CALENTAMIENTO | mm        |       |
| ROTACIÓN                  | RPM       |       |
| CAUDAL DUCHA EXTERIOR     | GPM / LPM |       |
| CAUDAL DUCHA INTERIOR     | GPM / LPM |       |
| CAUDAL DUCHA AUXILIAR     | GPM / LPM |       |
| CONCENTRACIÓN DEL QUENCH  | %         |       |
| TEMPERATURA DEL QUENCH    | °C        |       |
| VELOCIDAD DE SCAN         | mm / seg  |       |

### 3. Análisis metalográfico

Consiste en el análisis de la pieza que se ha sometido al tratamiento térmico por inducción, con la finalidad de corroborar que esta tenga las dimensiones y propiedades deseadas de acuerdo con los planes de control especificados por la parte del diseño de los componentes.

Este análisis se realiza mediante una prueba destructiva del componente, es decir cortando la pieza, las zonas de corte están especificadas en los planes de control y corresponden a las áreas críticas del componente, como resultado del corte se obtendrán probetas que a la postre se les realizan pruebas de dureza, medición de dimensiones del temple, así como la revisión del tipo de microestructura.

Cada vez que se realice una iteración de tratamiento térmico se debe cortar la pieza de acuerdo con el plan de control específico, un ejemplo de ello se puede observar en la figura 3.9, donde se observa la zona para evaluar los resultados.

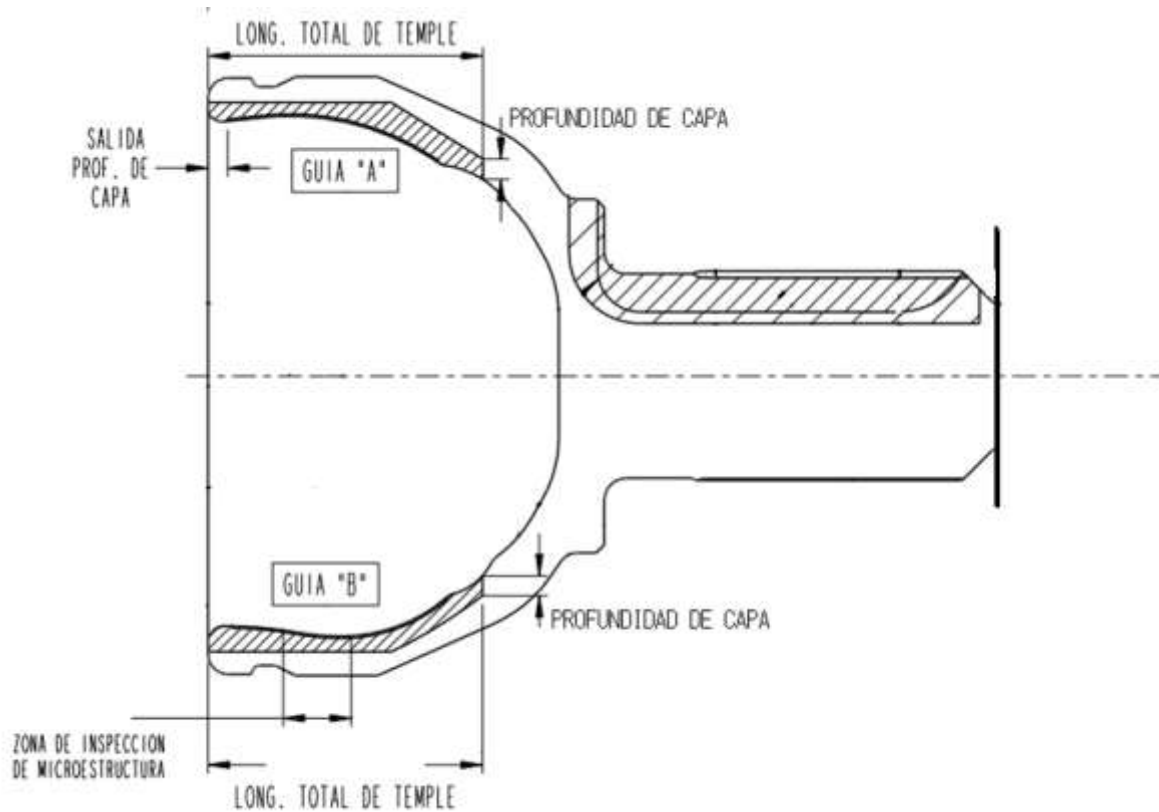


Figura 3.9 Plano para la evaluación de capa de temple.

Una primera evaluación se puede realizar de manera rápida para determinar si está cerca de las dimensiones requeridas, ya que es posible ver el temple a simple vista después de cortar y limpiar la zona, si se aprueba este filtro, es momento de realizar un análisis metalográfico, donde se le evaluará:

- ✓ Análisis de dimensiones de la capa de temple.
- ✓ Medición de dureza en la capa efectiva de temple y las partes que no deben llevar tratamiento térmico.
- ✓ Análisis de la microestructura de la capa efectiva de temple.

#### 4. Liberación y documentación del proceso

Una vez que se hayan obtenido las propiedades deseadas en el componente, se documentarán las variables que permitieron obtener dichas características y servirán para ser consultadas cuando sea necesario, es decir, cuando ese modelo específico se vaya a producir en esa línea.

Un punto importante es que, debido a la variación de los modelos y condiciones de las máquinas, es necesario llevar a cabo un prototipo en cada una de ellas ya que varían los parámetros de operación entre ellas, es decir, no será la misma receta para la línea “A” que para la línea “B” o “C”, a pesar de que sea el mismo componente, por ello es necesario realizar el procedimiento anterior por cada línea donde se vaya a producir cierto modelo.

### **5. Entrega de documentos de validación**

Al concluir con la liberación del proceso, se generará con ello la validación (VER ANEXOS E) donde se especifica la metodología usada para el desarrollo del inductor, donde se incluyen las etapas de:

- ✓ Diseño.
- ✓ Simulación de tratamiento térmico.
- ✓ Simulación de impresión 3D del inductor.
- ✓ Liberación y validación del proceso.

Con lo cual se genera un resumen que permite comprobar el procedimiento y de manera integral asegurar que el inductor es apto para el proceso, bajo esas especificaciones de diseño y parámetros de trabajo.

## CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Este capítulo 4 presenta la implementación de la metodología propuesta en el capítulo 3, a través de un ejemplo llevado a cabo de manera real, recordando que la validación se realiza en la última etapa de la metodología (corrida de prototipo), es ahí donde se determina si el desarrollo del inductor satisface la necesidad del temple en el componente de la CV-Joint de lo contrario es rechazado y vuelto a rediseñar.

La metodología se aplica a un modelo de junta fija, para poder realizar la validación, posteriormente los resultados de esta se extrapolarán a los demás números de parte y a los demás componentes producidos, hasta completar la totalidad dentro de la producción, las cuales conforman la CV-Joint y que requieren el tratamiento térmico.

La justificación de la validación del inductor se establece a través de un protocolo de validación (ANEXOS A, B, C y D), el cual será alimentado por información clave de cada una de las etapas y contendrá un resumen de todo el desarrollo del proceso.

### **4.1. Diseño del inductor**

El desarrollo del proyecto comienza con el diseño de la bobina de inducción, la cual, como ya se ha mencionado anteriormente, se adapta para satisfacer la necesidad a resolver. Para la implementación se usa el ejemplo en el componente denominado como junta fija (recordando que dentro de la flecha de velocidad constante es la acoplada al lado rueda), más específicamente en la parte interior la cual se denomina campana, ya que representa el porcentaje más alto de producción, a la postre este mismo proceso se extrapolará a los demás componentes hasta completar la totalidad de la producción.

En esta parte la junta fija dispone de una zona denominada como "guías" donde en la aplicación se deslizan unas bolas de acero, esto representa una zona expuesta a alto desgaste por lo cual es necesario el tratamiento térmico.

De acuerdo con los requerimientos de tratamiento térmico la bobina se ajusta a la geometría que se desea temprar. En la figura 4.1 se muestra un diseño CAD con la geometría aproximada del componente, la zona de color amarillo es donde se aplica el tratamiento térmico, en esa misma zona se pueden apreciar las guías (es necesario aclarar que por motivos de confidencialidad la junta fija no corresponde a la producida, es una aproximación).

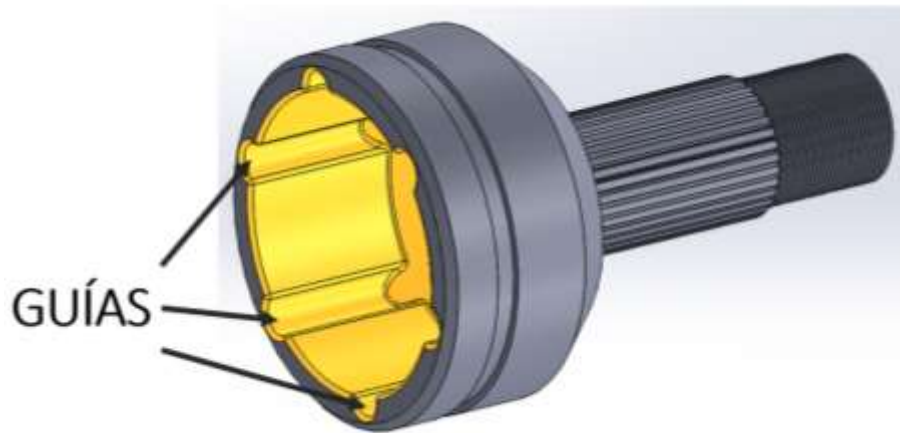


Figura 4.1 Diseño CAD aproximado del componente para tratamiento térmico.

Para el posicionamiento y diseño de los componentes se toma en cuenta que entre más cerca estén la bobina y la cara a temprar, se obtendrá una mejor transformación, sin embargo, se debe restringir esta distancia para que no exista colisión entre ellos, ya que la pieza va a rotar, por ello el diseño debe considerar que entre la geometría de la bobina y la cara a templar exista una holgura con ello se obtiene un tratamiento térmico adecuado y se asegura que no exista peligro de colisión entre estos.

Para la fabricación de las bobinas de inducción mediante impresión 3D, existen una serie de restricciones a partir de las cuales se restringe la geometría del diseño, como lo son que la bobina debe ser hueca para permitir la refrigeración de

esta con la finalidad de evitar sobrecalentamiento con un grosor mínimo de la pared tal que evite fugas.

La bobina se diseña con un número específico de espiras de acuerdo con la capacidad de la máquina de temple (esto debido a la potencia que puede suministrar la máquina, en términos eléctricos, se puede resumir a un sistema de capacitancia e inductancia).

De manera general, el diseño del ensamble del inductor está estandarizado para las máquinas por lo que el nuevo inductor se concentra en el diseño de la geometría y tamaño de las espiras de la bobina.

Posteriormente, las salidas del refrigerante se diseñan a un tamaño estándar, con el objetivo de ser montado en bases estándar que puedan acoplarse a las máquinas de inducción.

En esta parte del proceso también es necesario considerar la parte de los concentradores de flujo magnético, recordando que son los que nos ayudarán a direccionarlo hacia dónde se necesite la mayor concentración de calor de acuerdo con la geometría de la capa de temple deseada.

En la primera iteración el diseño se desarrolla de acuerdo con la experiencia del ingeniero, posteriormente se realizarán las interacciones necesarias hasta afinar el diseño de acuerdo con los resultados obtenidos en las siguientes etapas del proceso como lo son:

- La simulación de tratamiento térmico.
- La determinación de la factibilidad de impresión 3D.
- La corrida del prototipo.

Lo ideal es que el proceso sea iterativo en las primeras dos, y que en la tercera no sea necesario, ya que en esta etapa representa un paro de línea y pérdida de tiempo de producción.

Una vez concluido el diseño se reporta para el protocolo de validación la información a partir de la cual se realizó, en la figura 4.2 se muestra una fracción de la hoja extraída del ANEXO A donde se concentra dicha información.

| Protocolo de validación                     |                                   |                                      |  |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>DISEÑO DE INDUCTOR</b>                   |                                   | <b>Tipo de inductor</b>              |  |
| UDN: <u>Junta Fija (Campana)</u>            | Vestago <input type="checkbox"/>  | SCAN <input type="checkbox"/>        |  |
| Línea: <u>L. xx</u>                         | Guías <input type="checkbox"/>    | Single Shot <input type="checkbox"/> |  |
| Máquina: <u>T-xxxx</u>                      | Reverdo <input type="checkbox"/>  |                                      |  |
| Número de parte: <u>xxxxxxxx</u>            | Pista <input type="checkbox"/>    |                                      |  |
| Tipo de acero: <u>AISI 1045</u>             | <b>Tipo de Fabricación</b>        |                                      |  |
| STD refendo: <u>          </u>              | Conv <input type="checkbox"/>     | Activa <input type="checkbox"/>      |  |
| Código de inductor: <u>JUNTA FIJA 133 A</u> | Nivel: <u>PROTOTIPO</u>           |                                      |  |
|                                             | Número de refacciones: <u>N/A</u> |                                      |  |

Figura 4.2 Diseño del inductor en el protocolo de validación.

Esta información incluye algunos puntos críticos para la creación del diseño, como lo son:

La UDN (unidad de negocio) se especifica de acuerdo con el componente a templar, dentro de la gama que se produce para las CV-Joint, estos pueden ser:

- Junta fija
- Junta deslizante
- Semiejes
- Pista interna

El tipo de acero, para el ejemplo se utiliza el acero AISI 1045, que es una equivalencia comercial al acero que se utiliza en la realidad.

El tipo de inductor que especifica la parte del componente que se va a tratar térmicamente y en el cual se enfoca el diseño del inductor.

El método por el que se va a realizar, recordando que en el “*single shot*” la pieza y el inductor tienen una misma posición relativa, mientras que en el de “*SCAN*”, la pieza que regularmente es un eje se desplaza transversalmente para lograr completar el calentamiento.

Finalmente, como algunos inductores aún se fabrican con la metodología convencional, es necesario especificar el tipo de fabricación, la idea es mudar todo a fabricación aditiva.

Es necesario también incluir el plano con el cual se fabrica la bobina y el ensamble del inductor. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de un plano del ensamble del inductor donde está listo para ser llevado a la corrida en línea, esto en el caso de que sea aprobado en la simulación de TT y de impresión 3D.

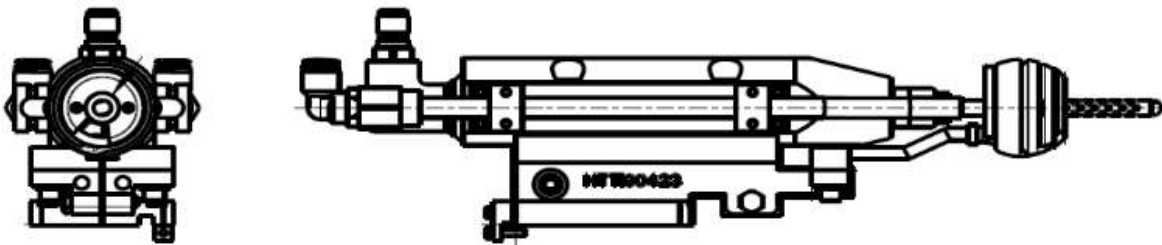


Figura 4.3 Plano del ensamble del inductor.

Por último, es necesario disponer del formato CAD de la bobina para las consiguientes etapas del proceso.

La validación de la etapa de diseño del inductor se realiza en la puesta a punto descrita más adelante.

#### 4.2. Simulación de tratamiento térmico

La parte de la simulación del tratamiento térmico es establecida en primera instancia para resolver la problemática de la pérdida de tiempo en línea de producción, ya que como parte del proceso es necesario realizar la puesta a punto para poder comenzar con la producción, esta parte se refiere a establecer los parámetros necesarios para cumplir con los requerimientos de tratamiento térmico.

La realización de la puesta a punto se ha realizado hasta ahora y durante mucho tiempo mediante la prueba y error de parámetros, de acuerdo con la experiencia del personal, sin embargo, esta forma conlleva consigo la pérdida excesiva de tiempo de producción al ser necesario pruebas destructivas y análisis metalográfico en las piezas cada vez que se modifiquen los parámetros de temple.

Por lo anterior, la simulación de tratamiento térmico se plantea cómo una solución viable para el establecimiento de parámetros iniciales obtenidos mediante software de simulación por elemento finito que nos acerquen a los parámetros de trabajo ideales, con el objetivo de reducir el tiempo de paro de producción de línea.

Hasta este momento del proceso de desarrollo del inductor, se cuenta con una propuesta de la bobina y la pieza a temprar ambos en formato CAD, estos dos componentes son necesarios para comenzar con la simulación.

En el entorno del software se construye el ensamble de la pieza a temprar con la bobina asemejando la forma de trabajo en la realidad, el cual se muestra en la figura 4.4 donde se ve la bobina diseñada dentro del componente.

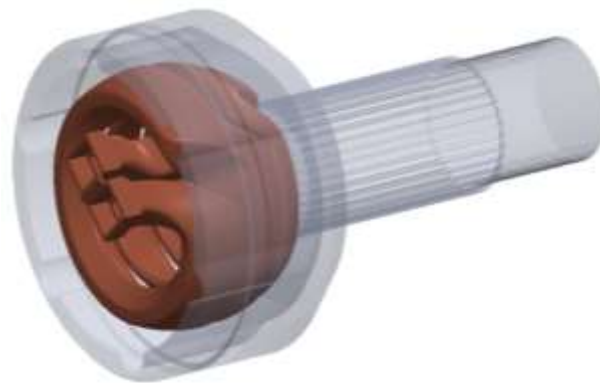


Figura 4.4 Ensamble para la simulación del tratamiento térmico.

Posteriormente, se proponen una serie de parámetros que de acuerdo a la experiencia del ingeniero de simulación podrán acercarse al resultado deseado, la ventaja de la realización mediante sistemas computacionales es que no hay sacrificio de tiempo de producción, por lo cual se pueden realizar las iteraciones necesarias hasta obtener el resultado esperado.

En la tabla 4.1 se muestran los parámetros que se le deben proveer al software para comenzar con la simulación, y que serán sugeridos para las pruebas en línea, además que serán reportados en el protocolo de validación, la tabla es extraída del ANEXO B.

Tabla 4.1 Parámetros para simulación de TT.

| Parámetros de simulación    |  |
|-----------------------------|--|
| Capacidad de generador (Kw) |  |
| Frecuencia (KHz)            |  |
| Potencia (%)                |  |
| Tiempo Calentamiento (s)    |  |
| Tiempo Enfriamiento (s)     |  |
| Velocidad de rotación (rpm) |  |

Una vez que se ha realizado la propuesta de parámetros, se comienza con la simulación; el resultado será un perfil de calentamiento como el mostrado en la figura 4.5, donde este perfil de calentamiento está acorde a la temperatura de austenización del acero, por lo cual, al aplicar el enfriamiento se obtendrá la transformación a martensita y se tendrá como resultado la transformación deseada, tal como se muestra en la figura 4.6. Estos dos perfiles también serán reportados en el protocolo de validación.



Figura 4.5 Perfil de temperatura en el tratamiento térmico.



Figura 4.6 Perfil de endurecimiento para dos tipos de guías de una junta fija.

Los resultados obtenidos en los perfiles se documentan en los formatos correspondientes, es decir, se registra la profundidad de capa de temple para ser comparada con los estándares de calidad. La tabla 4.2 es un ejemplo que contiene los valores para una junta fija con dos tipos de guías, la GUIA A y la GUIA B, dicha tabla tendrá valores máximos y mínimos de tolerancia de acuerdo con los planes de control. En la última columna se reporta el valor obtenido en el dimensionamiento. Esta tabla fue extraída del ANEXO 2 y también se incluye en el protocolo de validación.

Tabla 4.2 Dimensiones del perfil de transformación obtenido en la simulación de TT

|        |   | MIN | MAX | GUIAS |
|--------|---|-----|-----|-------|
| GUIA   | 1 |     |     |       |
|        | 2 |     |     |       |
|        | 3 |     |     |       |
|        | 4 |     |     |       |
|        | 5 |     |     |       |
| GUIA B | 1 |     |     |       |
|        | 2 |     |     |       |
|        | 3 |     |     |       |
|        | 6 |     |     |       |
|        | 7 |     |     |       |

En términos generales lo que se obtiene como resultado de esta etapa para alimentar el protocolo son las dimensiones del perfil de calentamiento mostrada en la imagen anterior y una lista de parámetros, los cuales deben ser llevados junto con el inductor a la corrida del prototipo y en ese momento se puede comenzar con las iteraciones de la última etapa.

Los resultados de parámetros en la simulación se consideran como ideales y seguramente van a diferir con los resultados en la realidad, esto debido en gran medida al estado de las máquinas, pero se espera que estos no se diferencien en gran medida de lo que se puede esperar en la realidad.

#### **4.3. Determinación de la factibilidad de impresión 3D**

Esta etapa está destinada, al igual que la anterior, a afinar el diseño propuesto, debido a que se tiene el objetivo de determinar, primero si es posible obtener de manera real la geometría diseñada en la primera etapa (diseño de la bobina de inducción) esto a través de la impresión 3D, en este caso fabricada de cobre, y segundo la determinación de los parámetros que permitan obtener una bobina lo más apegada al modelo diseñado, esto evitando la mayor cantidad de defectos posibles.

En realidad esta etapa es independiente de la etapa anterior de simulación de tratamiento térmico, si bien pueden realizarse a la par, en la metodología se decidió primero evaluar el temple en el componente, para saber si con este inductor es posible obtener los perfiles de endurecimiento que solicitan los planes de control, de lo contrario, generar otra propuesta para posteriormente realizar la factibilidad de impresión, así mismo, si en esta etapa se determina que no es posible imprimirse, se procede a un rediseño y este modelo se debe volver a simular para el tratamiento térmico.

Al igual que en la etapa anterior, se cuenta con el diseño CAD de la bobina de inducción, que será el punto de partida, para esto se integra al entorno del software, y se proponen parámetros de impresión, para después comenzar con la simulación.

Esta etapa se puede dividir en dos partes fundamentales, la primera denominada pre-proceso, dónde el software genera los preparativos para simulación, aquí se generan por default una serie de soportes en la geometría necesarios para la construcción de la bobina, un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.7, la cual también se agrega en el protocolo de validación.

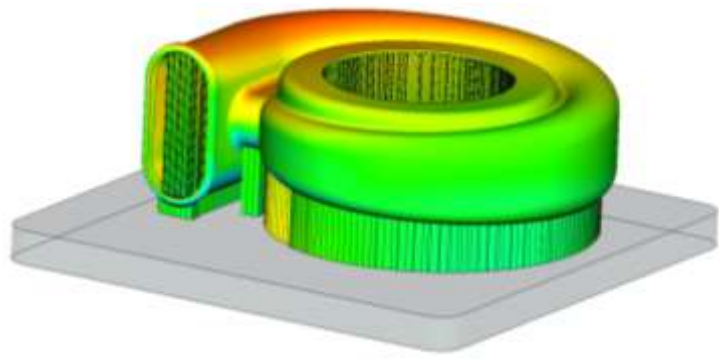


Figura 4.7 Plataforma de construcción con la generación de soportes (extraído de la página de Simufact additive).

La cantidad, tamaño y posición de los soportes es importante para la aplicación del tratamiento térmico, ya que es necesario asegurar que la bobina sea hueca en la parte interior para ser refrigerada, por ello, si los soportes se generan internamente no se podrán retirar, pero en el exterior no hay problema ya que se pueden retirar con operaciones posteriores a la impresión. Así mismo, el software arroja una serie de valores que describen el tipo soportes adaptados al diseño, estos valores son los reportados en una tabla como la 4.3 extraída del ANEXO 3, la cual se incluye en el protocolo de validación.

Tabla 4.3 Configuración de los soportes para la impresión 3D.

| Configuración de soportes    |  |
|------------------------------|--|
| Tipo                         |  |
| Diámetro (mm)                |  |
| Distancia de separación (mm) |  |
| Diámetro de soportes (mm)    |  |
| Masa para soportes (g)       |  |

La creación de estos soportes responde a la creación de voladizos que colapsarían en el proceso, es por ello que, a fin de evitar la colocación de soportes internos, se toman en consideración una distancia máxima de impresión 3D en cantiléver, mayor a eso las capas de impresión comenzarán a derrumbarse, así

mismo existen ángulos permisibles para evitar defectos de este tipo, los cuales permiten la construcción de paredes que no sean verticales.

Por lo anterior, cada vez que un diseño se someta a la simulación de impresión 3D, el software arroja resultados indicando en qué zonas no se cumple con estas reglas o crea soportes, y lo cual deriva en defectos. La aparición de alguna de estas alertas causa el rechazo del modelo y es necesario un rediseño, hasta asegurar que no exista ningún problema de este tipo. Una vez que cumpla con estas restricciones se procede con la simulación donde se obtienen los resultados para la siguiente parte de esta etapa, el post proceso.

En el post-proceso, el software realiza la simulación de la impresión, recordando que el método utilizado para la impresión es el de “*Powder Bed Fusión*”, donde la materia prima es un polvo de cobre que se une capa por capa mediante láser, lo que a grandes rasgos es una soldadura, por lo cual se acarrean problemas relacionados con esta.

Así mismo, al iniciar la simulación se plantea una serie de parámetros de acuerdo con el componente que se desea imprimir, afinándolos hasta lograr una impresión aceptable de acuerdo con los requerimientos. Estos parámetros se concentran en la tabla 4.4, extraída del ANEXO C, lista para agregarse al protocolo. Los datos mencionados son con los que se genera la impresión de manera real para obtener la bobina.

Tabla 4.4 Parámetros para la impresión de la bobina 3D.

| Parametros sugeridos |  |
|----------------------|--|
| Power (W)            |  |
| Speed (mm/s)         |  |
| Layer thickness (mm) |  |
| Recoatertime (s)     |  |
| Scanning strategy    |  |
| Hatch distance (mm)  |  |

Dentro de los resultados arrojados por el software y que se analizan para determinar si es factible obtener la bobina a partir de ese diseño están los siguientes:

### **Distorsión [mm]**

Establece la deformación que se genera de manera real en comparación al modelo diseñado, esto debido a la potencia suministrada y la velocidad de impresión ya que, dependiendo de estos parámetros, las capas se construirán más rápido o más lento, y se dará tiempo que se enfríen o no, lo que en últimas instancias crea deformaciones que se suman hasta provocar una distorsión final, que se diferencia del modelo original.

Es importante controlar estas distorsiones, ya que de lo contrario pueden provocar que el inductor no pueda montarse en las bases estándar al variar su alineación, o inclusive, ser más grandes que las campanas, en el caso de la junta fija y provocar colisiones.

### **Esfuerzos residuales [MPa]**

Los esfuerzos residuales son un fenómeno presente en cualquier soldadura, debido al aumento y disminución brusca de la temperatura en el material, al formar la totalidad del componente mediante este método se genera una gran cantidad de este tipo de esfuerzos que posteriormente pueden derivar en grietas y fisuras en este.

Para controlar el nivel de esfuerzos residuales, se debe controlar la temperatura de la base de impresión y los valores de los parámetros a fin de reducir esos cambios bruscos de temperatura, así mismo se recomienda que después de la impresión se les aplique un tratamiento térmico de revenido a fin de reducir estos esfuerzos y no tener mayor complicación.

Para la evaluación del nivel de esfuerzos residuales, el software arroja una escala de colores con los esfuerzos máximos, estos se reflejan en la geometría, para el caso de una aleación de cobre que comúnmente se utiliza para la impresión 3D (C18150, de acuerdo al Specialty Handbook- Copper and Copper Alloys de la

ASTM [19]), el cual tiene un valor de esfuerzo a la cedencia de entre 430-515 MPa, es decir que los esfuerzos residuales presentes en la pieza impresa son menores a este valor y por lo tanto no representan ningún problema para la generación de defectos como fisuras.

Si los valores de los esfuerzos residuales superan el valor máximo de cedencia del material o inclusive el valor de esfuerzo último de material, el componente tiene una alta probabilidad de presentar agrietamientos.

### **Densidad [%]**

Este resultado es importante ya que muestra el nivel de densidad de la impresión 3D, para la aplicación del tratamiento térmico ya que será a través del material que se transportará la energía eléctrica para la generación del campo magnético, por lo que sí se reduce la densidad la conducción eléctrica se verá mermada.

De igual manera una mayor densidad asegura menor cantidad de porosidades del componente, con ello se asegura que no existan fugas del refrigerante interno.

Las imágenes de los resultados anteriores se guardarán y llevarán al protocolo de validación para corroborar que el inductor diseñado corresponda con el inductor en físico.

Al igual que las dos etapas anteriores, los resultados obtenidos en esta etapa se evalúan en la puesta a punto del proceso, ya que es ahí donde se evalúa si la impresión 3D del inductor cumple con los requerimientos para el tratamiento térmico.

### **4.4. Puesta a punto del tratamiento térmico**

Esta es la última etapa del desarrollo de la bobina de inducción, en conjunto es donde se evalúan y validan los resultados de las etapas descritas anteriormente, en orden se evalúa si con el diseño propuesto es posible obtener el tratamiento térmico del componente, también si los parámetros obtenidos en la simulación son cercanos con los que se ajustan para comenzar la producción y si la impresión de la bobina nos permite obtener el resultado esperado

Las etapas previas nos permiten hasta ahora tener en el siguiente orden:

1. Un diseño CAD que cumple con los requisitos para el tratamiento térmico, evaluado a través de una simulación de elemento finito, de igual manera evaluado a través de la factibilidad de impresión, asegurando que no presenta ninguna inconformidad en su fabricación a través de este método.
2. Parámetros de tratamiento térmico, obtenidos a partir de la simulación de la bobina en conjunto con la pieza de trabajo, esto cumpliendo con las especificaciones dimensionales de los estándares de calidad.
3. La bobina fabricada con manufactura aditiva, a partir de los resultados y parámetros especificados en la factibilidad de impresión.

Finalmente, el ensamble del inductor listo para ser montado en la máquina de temple, mismo que se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8 Ensamble del inductor para temple por tratamiento térmico.

De acuerdo con el desarrollo de la metodología mostrada en el capítulo 3, una vez que se disponga del inductor, este se montará en la máquina de temple a través de patrones que permitirán ajustar la posición del inductor con respecto a la pieza a temprar, hasta lograr una posición en la cual se evite la colisión.

Al concluir con dichos ajustes, el inductor estará dispuesto para el tratamiento térmico. En la figura 4.9 se puede observar cual es la posición final del inductor donde apenas sobresale del plato para la sujeción del componente.



Figura 4.9 Inductor montado, dispuesto para el tratamiento térmico.

Cómo se había mencionado anteriormente, cada máquina de temple tiene cierta capacidad. En la figura 4.10 se muestran las especificaciones de potencia de una máquina real, y es de acuerdo con estas especificaciones que se considera la simulación y la obtención de parámetros de manera ideal, esto se especifica en el número de máquina dentro del protocolo de validación.

| INPUT RATINGS:                          |         |        |           |
|-----------------------------------------|---------|--------|-----------|
| VOLTS MIN/MAX.                          | 458/504 | P.F.   |           |
| AMPS. MAX.                              | 598     | KVA    | 452       |
| FREQ. Hz.                               | 60      | PHASE  | 3         |
| OUTPUT RATINGS:                         |         |        |           |
| VOLTS                                   | 1635    | KW     | 400       |
| AMPS.                                   | 2000    | KVA    |           |
| FREQ. Hz.                               | 10000   | PHASE  | 1         |
| COOLING WATER DATA:                     |         |        |           |
| MAX. INLET PRESSURE:                    |         | 70 PSI |           |
| MAX. INLET TEMPERATURE:                 |         | 100°F  |           |
| MIN. INLET TEMPERATURE: ABOVE DEW POINT |         |        |           |
| WATER FLOW:                             |         | 49 GPM | AT 30 PSI |
| DIFF.                                   |         |        |           |

Figura 4.10 Especificaciones de una máquina de temple

Una vez montado el inductor en la máquina, se procede a iniciar directamente con las pruebas, donde se establecen los parámetros obtenidos en la simulación de

tratamiento térmico. En la figura 4.11 se observa un display de una máquina de temple, donde se pueden ver los parámetros necesarios para el temple por inducción.

| Parameter                        | Value | Units  |
|----------------------------------|-------|--------|
| Bell Pre Heat Power Level        | 0     | %KW    |
| Bell Pre Heat Heat Time          | 0     | Sec    |
| Bell Soak Time                   | 0     | Sec    |
| Bell Power Level                 | 46    | %KW    |
| Bell Heat Time                   | 2.2   | Sec    |
| Bell ID Quench Delay             | 2.2   | Sec    |
| Bell ID Quench Time              | 4     | Sec    |
| Bell ID1 Quench On/Off           | 1     | 1 = On |
| Bell ID2 Quench On/Off           | 1     | 1 = On |
| Bell ID3 Quench On/Off           | 1     | 1 = On |
| Bell OD Quench Delay             | 1     | Sec    |
| Bell OD Quench Time              | 3     | Sec    |
| Bell Heat Position               | 5.357 | Inches |
| Bell Quench Position             | 5     | Inches |
| Bell Face Quench On/Off          | 0     | 1 = On |
| Bell Rotation Speed              | 300   | RPM    |
| Bell Cooling Flow High Limit     | 100   | GPM    |
| Bell Cooling Flow Low Limit      | 0     | GPM    |
| Bell Cooling Pressure High Limit | 170   | PSI    |
| Bell Cooling Pressure Low Limit  | 0     | PSI    |
| Bell X Axis Position             | 0.044 | Inches |
| Bell Y Axis Position             | 0.246 | Inches |

Figura 4.11 Display de máquina de temple.

Después de realizar cada iteración es posible observar en primera instancia la zona de calentamiento.

En el momento en que la zona oscurecida tiene las características adecuadas, es decir una aproximación a las dimensiones deseadas, es momento para cortar la pieza de forma transversal y medirla para determinar si se encuentra dentro de los estándares solicitados.

Como puede verse en la figura 4.12, la zona de transformación se torna de un color más brillante en comparación con el resto. La sección transversal se prepara metalográficamente para conocer las fases presentes luego del temple por inducción.

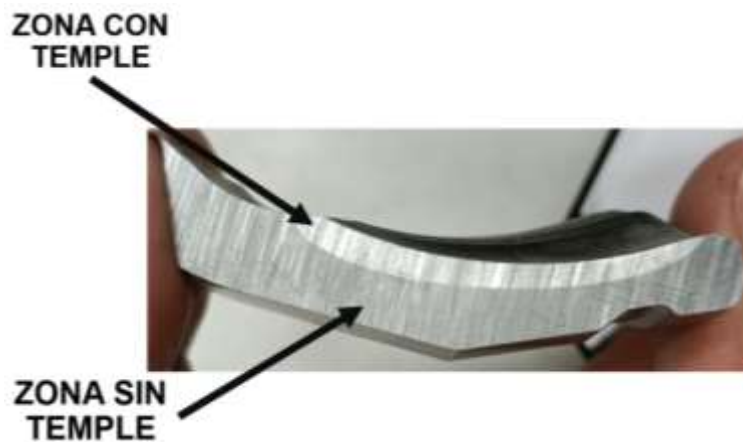


Figura 4.12 Sección transversal de una pieza tratada térmicamente.

Una vez que la medición en piso sea satisfactoria, varias piezas son templadas, cortadas y preparadas metalográficamente para realizar pruebas de:

- ✓ Dureza, los valores para la martensita zona templada van entre: 58-62 HRC (653-753 HV)
- ✓ Dimensiones, las cuales varían de acuerdo con el componente que se temple en este caso se especifica en la figura 4.13
- ✓ Tipo de transformación, en este caso es asegurar la transformación a martensita y un tamaño de grano 8 de acuerdo a la norma AISI.

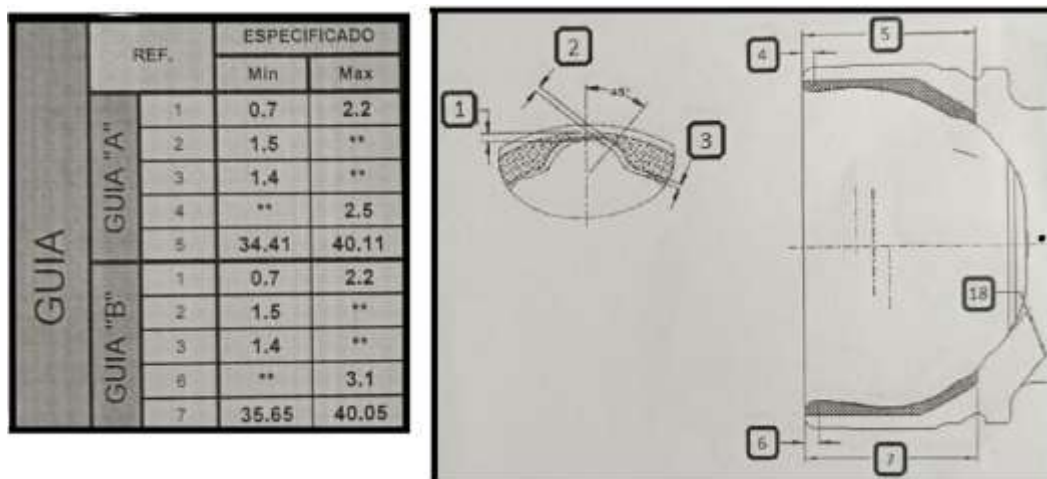


Figura 4.13 Tolerancias de dimensiones de temple.

Si las muestras no cumplen con los valores requeridos, el proceso es rechazado y se ajustan los parámetros de temple para volver a realizar una nueva iteración, en caso contrario, si los valores son cumplidos, el proceso queda liberado.

Una vez entregada la liberación, el proceso el inductor es apto para comenzar con la producción, y es momento de comenzar con la validación.

## CAPÍTULO 5 VALIDACIÓN DEL PROCESO

Este último capítulo se enfoca en proporcionar de manera general la forma en que se valida el proceso de desarrollo del inductor, una vez obtenida la liberación del proceso de tratamiento térmico (puesta a punto), es decir cuando se haya evaluado las propiedades sobre una probeta del componente templado obtenido en la máquina de temple, y resulten satisfactorias acorde a los planes de control.

Con esta validación se comprueba que con el inductor desarrollado es posible obtener repetitivamente componentes con el perfil de endurecimiento y características requeridas, estos resultados sirven para corroborar la información si en algún momento de la producción, estos comienzan a ser rechazados por dicho proceso. La figura 5.1 muestra un diagrama de las tres etapas que se validan con la puesta a punto, las cuales son las previas a esta.



Figura 5.1 Validación de las etapas de diseño del inductor.

### 5.1. Validación del diseño del inductor a través de la liberación del proceso.

Conforme a lo establecido en la metodología, la primera etapa del desarrollo del inductor es el diseño de este, al poder obtener una puesta a punto del tratamiento

térmico, se establece que la propuesta de diseño cumple con los siguientes puntos:

1. Las dimensiones necesarias para evitar la colisión entre la pieza y el inductor.
2. La geometría externa que permite generar un campo magnético necesario para calentar la pieza en la zona requerida.
3. De igual manera la geometría interna del modelo permite el flujo de refrigerante para retirar el calor necesario para evitar el sobrecalentamiento del inductor.

Una vez que el proceso ha sido liberado y es apto para comenzar con la producción, se establece que el diseño del inductor es adecuado para obtener la capa efectiva de temple independientemente de los parámetros que se utilizaron, con ello el diseño queda validado, y es posible repetirlo para otras líneas de producción, obteniendo repetibilidad de los resultados. La etapa de la validación genera en el protocolo una hoja de resumen (ANEXO E), para la etapa de diseño se muestra la figura 5.2 donde se establece la información necesaria para la descripción de esta.



Formulario de diseño del inductor:

| DISEÑO DEL INDUCTOR |       |
|---------------------|-------|
| Linea / UDI:        | _____ |
| Máquina:            | _____ |
| No. de pieza:       | _____ |
| Tipo:               | _____ |
| Fabricación:        | _____ |
| Nivel:              | _____ |

AGREGAR PLANO

Figura 5.2 Resumen de información de la etapa de diseño.

## 5.2. Validación de la simulación de tratamiento térmico a través de la liberación del proceso

Una vez que se haya concluido satisfactoriamente el proceso de la puesta a punto, donde se han ajustado los parámetros de tratamiento térmico hasta obtener los que en la realidad nos producen las piezas que cumplan con los requerimientos en cuanto a geometría y propiedades mecánicas de la capa de temple en los componentes, se realiza una comparación entre los parámetros y dimensiones obtenidos de la simulación contra los resultados obtenidos de manera real.

Tanto la sugerencia de parámetros iniciales (simulación), como las medidas y propiedades de la capa efectiva de temple, si el error entre los dos resultados es menor al 5% el proceso podrá ser validado, de lo contrario será rechazado para replantear la simulación. La figura 5.3 muestra el apartado del resumen de la simulación de tratamiento térmico, así como los parámetros obtenidos de manera real.



Figura 5.3 Resumen de información de etapa de simulación de TT.

### 5.3. Validación de la impresión 3D del inductor a través de la liberación del proceso

De la misma manera la validación de la fabricación del inductor mediante la impresión 3D, se realiza mediante la funcionalidad de este, ya que podremos asegurar que el inductor no presentó defectos como distorsiones que impidieran montarlo en la máquina, tampoco porosidades que provocaran fugas del refrigerante. Con esto se valida que el diseño, los parámetros, orientaciones y soportes elegidos para su impresión son aceptables para su fabricación.

El apartado de resumen se muestra en la figura 5.4:

| IMPRESIÓN DEL INDUCTOR |                                                                                                                                                                                                                                                                               | NOTAS:     |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|--|--|-----------|--|--|----------|--|--|--|--|
|                        | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Aceptado</th> <th>Rechazado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Distorsión</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Esfuerzos</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Densidad</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> |            | Aceptado             | Rechazado | Distorsión           |  |  | Esfuerzos |  |  | Densidad |  |  |  |  |
|                        | Aceptado                                                                                                                                                                                                                                                                      | Rechazado  |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
| Distorsión             |                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
| Esfuerzos              |                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
| Densidad               |                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
|                        | Tiempo de impresión <input type="text"/>                                                                                                                                                                                                                                      |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
|                        | <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Autorizado</td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Rechazado</td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>                                                                                                         | Autorizado | <input type="text"/> | Rechazado | <input type="text"/> |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
| Autorizado             | <input type="text"/>                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |
| Rechazado              | <input type="text"/>                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                      |           |                      |  |  |           |  |  |          |  |  |  |  |

Figura 5.4 Resumen de información de etapa de simulación de TT.

Al concluir con la validación del proceso de desarrollo, se concluye con el protocolo de validación, el cual sirve como herramienta para la comprobación de la funcionalidad del inductor, como se mencionó en los primeros capítulos, los resultados obtenidos en este primer prototipo se extrapolarán para así cubrir la totalidad de los productos, para que cada uno de ellos cuente con su protocolo.

#### 5.4. Caso de estudio, implementación inductor G 133 B

A continuación, se presenta el protocolo de validación para la aplicación de un inductor fabricado mediante impresión 3D de cobre implementado de manera real en una línea de producción para el tratamiento térmico de las guías de una junta fija.

Recordando que dicho documento contiene la información necesaria con la que se desarrolló del inductor, así como los resultados de la implementación, es decir los parámetros de trabajo necesarios para el tratamiento térmico y la corroboración de su funcionamiento.

Dicho documento está dividido en las siguientes etapas:

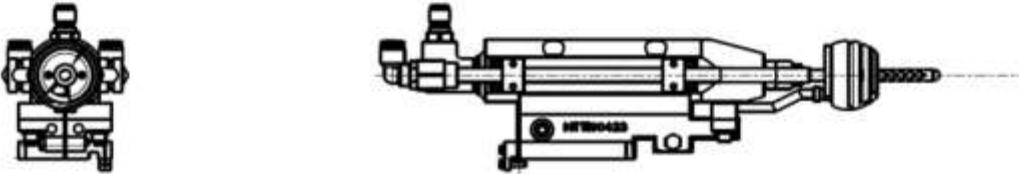
- Diseño del inductor.
- Simulación del tratamiento térmico.
- Simulación de la impresión 3D de la bobina.
- La puesta a punto del proceso.

En la figura 5.5 se muestra el apartado para el diseño del inductor, el cual es llenado en base a información necesaria para la propuesta de diseño, en él se encuentra:

1. UDN (Unidad de negocio): La cual se refiere al tipo de componente para el cual se va a diseñar el inductor, recordando que, de manera general, dentro de la empresa el tratamiento térmico se aplica a otros elementos como los semiejes, juntas deslizantes y pistas internas. En este caso se aplica para una junta fija.
2. Línea: Es la línea de producción donde se implementará el inductor, es importante especificar este dato ya que no todas líneas cuentan con las mismas maquinas.
3. Máquina: El número de la máquina para tratamiento térmico dispuesta en la línea de producción.
4. Número de parte: Un numero asignado para control interno de la empresa.
5. Tipo de acero: Es el acero a partir del cual se realiza la pieza fabricada (Junta fija en este caso), este dato es importante ya que no todos los aceros tendrán el mismo punto austenización, lo cual es necesario considerar para el diseño y las simulaciones del inductor, en este caso se utiliza una aleación semejante a AISI 1045.
6. Tipo de inductor: Para definir esta parte es necesario considerar el tipo de elemento que se va a temprar, en este caso es una junta fija, pero aun así este elemento tiene dos zonas de temple por lo que se especifica que las guías es la parte para la cual se diseña el inductor, así mismo se debe especificar que es de tipo Single Shot, recordando que el Scan se aplica a los vástagos.
7. Tipo de fabricación: Aquí se especifica el método de fabricación del inductor, actualmente se siguen construyendo algunos inductores por métodos convencionales, pero posteriormente este apartado se eliminará ya que se pretende adoptar la manufactura aditiva.

8. Nivel: Se refiere a qué estatus tiene el inductor, es decir, si es la primera vez que se prueba en la línea o ya se ha liberado anteriormente y se está reemplazando, en este caso está en nivel prototipo.

Finalmente se agrega el plano del ensamble del inductor, para poder identificarlo

| Protocolo de validación                                                              |                                | No. De Folio: E0001                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>DISEÑO DE INDUCTOR</b>                                                            |                                | <b>Tipo de inductor</b>                        |
| UDN: Junta Fija (Campana)                                                            | Vástago: <input type="text"/>  | SCAN: <input type="text"/>                     |
| Línea: L 11                                                                          | Guías: <input type="text"/>    | Single Shot: <input type="text"/>              |
| Máquina: T-7149                                                                      | Revenido: <input type="text"/> |                                                |
| Número de parte: 10476065                                                            | Pista: <input type="text"/>    |                                                |
| Tipo de acero: AISI 1045                                                             | <b>Tipo de Fabricación</b>     |                                                |
|                                                                                      | Conv: <input type="text"/>     | Aditiva: <input type="text"/>                  |
| Código de inductor: G-133 B                                                          | Nivel: PROTOTIPO               |                                                |
|                                                                                      | Número de refacciones: N/A     |                                                |
|  |                                |                                                |
| _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura UDN                                             |                                | _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura CIDETECMA |
| _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Presetting de Inductores                                    |                                |                                                |

Pag. 1

Figura 5.5 Apartado de diseño del inductor en el protocolo de validación

Como se describió en la metodología la siguiente etapa es la simulación del tratamiento térmico, para esto se muestra la figura 5.6, donde se plasman los resultados obtenidos mediante el software, aquí se encuentra una tabla llamada parámetros de simulación donde se tiene:

- Capacidad del generador: Que es la capacidad máxima que puede suministrar la maquina en la que se va a trabajar, en este caso se ha trabajado con una potencia máxima de 400 kW.
- Frecuencia de la corriente: Este es un parámetro que se controla para definir el tipo de microestructura del material obtenida después del tratamiento térmico.
- Potencia: Esta se define como porcentaje, ya que es la fracción que se ocupa a partir de la capacidad del generador para este ejemplo se utilizó 45% de los 400 kW.
- Tiempo de calentamiento: Es el tiempo en que estará energizada la bobina y el campo magnético esté activo calentando la pieza.
- Tiempo de enfriamiento: Es el tiempo en el que será suministrado el refrigerante.
- Velocidad de rotación: Es la velocidad con la que gira la pieza mientras se lleva a cabo el proceso de temple.

Una vez definidos estos parámetros se corrió la simulación y se obtuvieron los resultados, que de igual manera en este caso están plasmados en la misma hoja, en el software es posible medir las dimensiones de la parte de transformación para posteriormente generar una tabla comparativa que también viene en la misma hoja, en ella se puede ver las dimensiones mínimas y máximas permisibles de acuerdo con planes de control que se deben evaluar, así como los valores obtenidos en la simulación.

La figura 5.7, muestra más imágenes del perfil de calentamiento del tratamiento térmico con la finalidad de mostrar un panorama más completo de lo obtenido, y finalmente se integra una tabla, esta se genera una vez realizadas las pruebas en

línea y es una comparación de las medidas obtenidas de manera virtual con las medidas en el laboratorio a través de metalografía.

Al final se agrega una conclusión acerca de si con el diseño propuesto es posible obtener el perfil de calentamiento y con ello las propiedades adecuadas requeridas para el tratamiento térmico, en este caso es autorizado.

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|-----|------------------|------|--------------|-----|--------------------------|-----|-------------------------|---|-----------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|-----|-----|-------|--------|---|-----|-----|------|---|-----|--|------|---|-----|--|-----|---|--|-----|------|--------|---|-------|-------|------|---|-----|-----|------|---|-----|--|------|---|-----|--|------|--|---|--|-----|------|--|---|-------|-------|----|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |                                                                                                                                 | No. De Folio: E0001                      |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| <b>Simulación TT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Codigo de inductor: <u>G 133 B</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      | Inductor de serie: <input type="text"/>                                                                                         | Inductor prototipo: <input type="text"/> |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Solicitado por: <u>Manufactura Aditiva</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      | Analizado por: <input type="text"/>                                                                                             |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #2c3e50; color: white;">Parámetros de simulación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Capacidad de generador (Kw)</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>Frecuencia (KHz)</td> <td>10.6</td> </tr> <tr> <td>Potencia (%)</td> <td>45%</td> </tr> <tr> <td>Tiempo Calentamiento (s)</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>Tiempo Enfriamiento (s)</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Velocidad de rotación (rpm)</td> <td>300</td> </tr> </tbody> </table> |      | Parámetros de simulación                                                                                                        |                                          | Capacidad de generador (Kw) | 400 | Frecuencia (KHz) | 10.6 | Potencia (%) | 45% | Tiempo Calentamiento (s) | 2.2 | Tiempo Enfriamiento (s) | 4 | Velocidad de rotación (rpm) | 300 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MIN</th> <th>MAX</th> <th>GUIAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4" style="background-color: #2c3e50; color: white;">GUIA A</td> <td>1</td> <td>0.7</td> <td>2.2</td> <td>1.61</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1.5</td> <td></td> <td>1.97</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1.4</td> <td></td> <td>3.9</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td>2.5</td> <td>2.38</td> </tr> <tr> <td rowspan="4" style="background-color: #2c3e50; color: white;">GUIA B</td> <td>5</td> <td>34.41</td> <td>40.11</td> <td>36.1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.7</td> <td>2.2</td> <td>1.42</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1.5</td> <td></td> <td>2.47</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1.4</td> <td></td> <td>3.71</td> </tr> <tr> <td></td> <td>6</td> <td></td> <td>3.1</td> <td style="color: red;">4.16</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7</td> <td>35.65</td> <td>40.05</td> <td>36</td> </tr> </tbody> </table> |  |  |  | MIN | MAX | GUIAS | GUIA A | 1 | 0.7 | 2.2 | 1.61 | 2 | 1.5 |  | 1.97 | 3 | 1.4 |  | 3.9 | 4 |  | 2.5 | 2.38 | GUIA B | 5 | 34.41 | 40.11 | 36.1 | 1 | 0.7 | 2.2 | 1.42 | 2 | 1.5 |  | 2.47 | 3 | 1.4 |  | 3.71 |  | 6 |  | 3.1 | 4.16 |  | 7 | 35.65 | 40.05 | 36 |
| Parámetros de simulación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |      |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Capacidad de generador (Kw)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 400  |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Frecuencia (KHz)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 10.6 |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Potencia (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 45%  |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Tiempo Calentamiento (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2.2  |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Tiempo Enfriamiento (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4    |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Velocidad de rotación (rpm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 300  |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      | MIN                                                                                                                             | MAX                                      | GUIAS                       |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| GUIA A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1    | 0.7                                                                                                                             | 2.2                                      | 1.61                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2    | 1.5                                                                                                                             |                                          | 1.97                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3    | 1.4                                                                                                                             |                                          | 3.9                         |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4    |                                                                                                                                 | 2.5                                      | 2.38                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| GUIA B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5    | 34.41                                                                                                                           | 40.11                                    | 36.1                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1    | 0.7                                                                                                                             | 2.2                                      | 1.42                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2    | 1.5                                                                                                                             |                                          | 2.47                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3    | 1.4                                                                                                                             |                                          | 3.71                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6    |                                                                                                                                 | 3.1                                      | 4.16                        |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 7    | 35.65                                                                                                                           | 40.05                                    | 36                          |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| <div style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"><b>GUIA A</b></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      | <div style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"><b>GUIA B</b></div> |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| <b>Conclusiones:</b><br>De acuerdo con los resultados obtenidos por la simulación en TT, la geometría del inductor es de adecuada para generar el perfil de capa requerido por diseño.<br><hr/> <hr/> <hr/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |                                                                                                                                 |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |
| Autorizado <input checked="" type="checkbox"/> Rechazado <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      | Autorizado por: <input type="text"/><br><div style="text-align: right; font-size: small;">NOMBRE/FIRMA</div>                    |                                          |                             |     |                  |      |              |     |                          |     |                         |   |                             |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |     |     |       |        |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |     |   |  |     |      |        |   |       |       |      |   |     |     |      |   |     |  |      |   |     |  |      |  |   |  |     |      |  |   |       |       |    |

Figura 5.6 Apartado de la simulación de TT del inductor en el protocolo de validación (1/2)

| Protocolo de validación                                                            |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|----------------------|------------|------------|
|                                                                                    |   |                                                                                     |       |                             | No. De Faltas: E0001 |            |            |
| <b>Simulación TT</b>                                                               |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
| Codigo de inductor: <u>G 133 B</u>                                                 |   | Inductor de serie: <input type="text"/>                                             |       | Fecha: <input type="text"/> |                      |            |            |
| Solicitado por: <u>Manufactura Activa</u>                                          |   | Inductor prototipo: <input type="text"/>                                            |       |                             |                      |            |            |
|                                                                                    |   | Analizado por: <input type="text"/>                                                 |       |                             |                      |            |            |
| <b>PERFIL DE ENDURECIMIENTO</b>                                                    |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
| <b>GUIA A</b>                                                                      |   | <b>GUIA B</b>                                                                       |       |                             |                      |            |            |
|   |   |  |       |                             |                      |            |            |
| <b>GRADIENTE DE TEMPERATURA</b>                                                    |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
|  |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
| <p>Temperature, °C</p> <p>768 780 800 820 840 860 880 900</p>                      |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
| <b>CÁLCULO DE ERROR DE LA SIMULACION VS REALIDAD</b>                               |   |                                                                                     |       |                             |                      |            |            |
|                                                                                    |   | No°                                                                                 | MIN   | MAX                         | Dim simulacion       | Dim reales | Diferencia |
| <b>Guía A</b>                                                                      | 1 | 0.7                                                                                 | 2.2   | 1.61                        | 2.1                  | 0.49       |            |
|                                                                                    | 2 | 1.5                                                                                 |       | 1.97                        | 2.4                  | 0.43       |            |
|                                                                                    | 3 | 1.4                                                                                 |       | 3.9                         | 3.2                  | 0.70       |            |
|                                                                                    | 4 |                                                                                     | 2.5   | 2.38                        | 2.5                  | 0.12       |            |
|                                                                                    | 5 | 34.41                                                                               | 40.11 | 36.1                        | 37.7                 | 1.60       |            |
| <b>Guía B</b>                                                                      | 1 | 0.7                                                                                 | 2.2   | 1.42                        | 2.1                  | 0.68       |            |
|                                                                                    | 2 | 1.5                                                                                 |       | 2.47                        | 2.4                  | 0.07       |            |
|                                                                                    | 3 | 1.4                                                                                 |       | 3.71                        | 3.3                  | 0.41       |            |
|                                                                                    | 6 |                                                                                     | 3.1   | 4.16                        | 2                    | 2.16       |            |
|                                                                                    | 7 | 35.65                                                                               | 40.05 | 36                          | 38.1                 | 2.10       |            |

Pag. 3

Figura 5.7 Apartado de la simulación de TT del inductor en el protocolo de validación (2/2)

Para la parte de la factibilidad de impresión o simulación de impresión 3D, se propuso con una hoja la cual se muestra en la figura 5.8, en ella se muestran los parámetros que se utilizaron para la simulación, de forma general son enfocados en las características que tendrá el láser, que como ya se mencionó derrite el polvo de cobre (materia prima) y va uniendo las capas hasta formar la totalidad de la pieza. Para dichos parámetros se presenta una tabla, y aparte de esta, se agrega otra que especifica el tipo de soportes, además de que también es necesario agregar imágenes de lo que se obtendrá, en este ejemplo se omitieron por temas de confidencialidad.

En la figura 5.9, se muestra otra hoja que es parte del análisis de la factibilidad de impresión 3D, en esta se analizan diferentes aspectos que arroja la simulación, como lo son la distorsión, esfuerzos residuales y densidad ya que como se describió anteriormente, existen problema relacionados con estos resultados que comúnmente se presentan en la impresión 3D por la mala elección de parámetros, por lo cual es necesario controlarlos.

Al final se agrega una conclusión de la simulación y en este caso también fue autorizada la fabricación.

| No. De Folio: EG001                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--|-----------|-----|--------------|-----|----------------------|------|-----------------|------|-------------------|----------------|---------------------|------|---------------------------|--|------|-------------|---------------|-----|------------------------------|------|---------------------------------|------|------------------------|-------|---------------------|-----------|
| <b>FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D</b>                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Fecha: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Código de inductor: <input style="width: 100px;" type="text" value="G 133 B"/>                                                                                                                                                                                                                 | Inductor de serie: <input style="width: 50px;" type="text"/> Inductor prototipo: <input style="width: 50px;" type="text"/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Solicitado por: <u>Manufactura Aditiva</u>                                                                                                                                                                                                                                                     | Analizado por: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| <b>Posición sugerida de impresión</b>                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| AGREGAR<br>IMAGEN                                                                                                                                                                                                                                                                              | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #2c3e50; color: white;">Parámetros sugeridos</th> </tr> <tr><td>Power (W)</td><td>460</td></tr> <tr><td>Speed (mm/s)</td><td>700</td></tr> <tr><td>Layer thickness (mm)</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>Recoat time (s)</td><td>8.95</td></tr> <tr><td>Scanning strategy</td><td>Unidireccional</td></tr> <tr><td>Hatch distance (mm)</td><td>0.07</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #2c3e50; color: white;">Configuración de soportes</th> </tr> <tr><td>Tipo</td><td>Cilíndricos</td></tr> <tr><td>Diámetro (mm)</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Distancia de separación (mm)</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>Volumen total de soportes (cm³)</td><td>2.62</td></tr> <tr><td>Masa para soportes (g)</td><td>18.71</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Tiempo de impresión</td> <td>03:15 hrs</td> </tr> </table> | Parámetros sugeridos |  | Power (W) | 460 | Speed (mm/s) | 700 | Layer thickness (mm) | 0.08 | Recoat time (s) | 8.95 | Scanning strategy | Unidireccional | Hatch distance (mm) | 0.07 | Configuración de soportes |  | Tipo | Cilíndricos | Diámetro (mm) | 0.5 | Distancia de separación (mm) | 0.25 | Volumen total de soportes (cm³) | 2.62 | Masa para soportes (g) | 18.71 | Tiempo de impresión | 03:15 hrs |
| Parámetros sugeridos                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Power (W)                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 460                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Speed (mm/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 700                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Layer thickness (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0.08                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Recoat time (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                | 8.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Scanning strategy                                                                                                                                                                                                                                                                              | Unidireccional                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Hatch distance (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.07                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Configuración de soportes                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Tipo                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Cilíndricos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Diámetro (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Distancia de separación (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Volumen total de soportes (cm³)                                                                                                                                                                                                                                                                | 2.62                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Masa para soportes (g)                                                                                                                                                                                                                                                                         | 18.71                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Tiempo de impresión                                                                                                                                                                                                                                                                            | 03:15 hrs                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| <b>Conclusiones:</b><br>De acuerdo a los resultados obtenidos por la simulación, es posible imprimir el inductor utilizando<br>las orientación, configuración de soportes y parámetros sugeridos, utilizando un tratamiento térmico para reducir<br>los esfuerzos térmicos residuales<br>_____ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Autorizado: <input checked="" type="checkbox"/> Rechazado: <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                            | Autorizado por: _____<br><div style="text-align: right;">NOMBRE/FIRMA</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |
| Pag. 6                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |  |           |     |              |     |                      |      |                 |      |                   |                |                     |      |                           |  |      |             |               |     |                              |      |                                 |      |                        |       |                     |           |

Figura 5.8 Apartado de la simulación de impresión 3D del inductor en el protocolo de validación (1/2)

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | No. De Folio <b>E0001</b> |
| Fecha: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;"><b>Distorsión</b></div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <h2 style="margin: 0;">AGREGAR IMAGEN</h2> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>Las geometrias seleccionadas cumplen con las reglas de diseño para el proceso de impresion 3D, con lo cual el inductor no requiere de soportes internos.</p> <p>Las distorsiones presentadas durante el proceso de construccion no representan un problema para el funcionamiento, ya que son menores a las tolerancias permitidas por diseño.</p> <p>La distorsion máxima se presenta en la superficie a 45° de la espira interna.</p> </div> |                           |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;"><b>Esfuerzos residuales</b></div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <h2 style="margin: 0;">AGREGAR IMAGEN</h2> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>Los esfuerzos térmicos no representan un problema para el inductor, ya que estos no superan el límite de 237 Mpa del material, por lo cual no se presentan problemas de fisuras. Aun así se requiere un tratamiento térmico antes del retiro de los soportes para evitar distorsiones por esfuerzos térmicos.</p> </div>                                                                                                             |                           |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;"><b>Densidad</b></div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <h2 style="margin: 0;">AGREGAR IMAGEN</h2> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>La densidad del inductor es constante en todo su volumen. Lo que se interpreta que el inductor no tendrá fisuras, aunque no esta exento de presentar microfisuras o porosidades.</p> </div>                                                                                                                                                                                                                                                      |                           |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;"><b>Pag. 7</b></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                           |

Figura 5.9 Apartado de la simulación de impresión 3D del inductor en el protocolo de validación  
(2/2)

En la figura 5.10 muestra el llenado de la tabla que se utilizó para la liberación del proceso de tratamiento térmico, es decir, son los parámetros con los que se obtuvo una capa efectiva de temple en el componente, esto después de ser evaluada en el laboratorio metalográfico, dichos parámetros se guardan ya que con ellos se comenzará con la producción, idealmente serían iguales que los propuestos en la simulación de tratamiento térmico, pero en la realidad influyen muchas más variables de las que se contemplan en dicha simulación.

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|--|-----|--|-----|--|-----|--|---|--|-----|--|-------|--|-----|--|------|--|------|--|----|--|----|--|----|--|-----|
| <b>PARAMETROS DE LIBERACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                         | No. De Folio: E0001                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>Unidad de negocio: Junta Fija (Campana)</p> <p>Línea: L11</p> <p>Máquina V-7149</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>Numero de parte: 10476065</p> <p>Tipo de acero: UC1</p> <p>STD GKN referido:</p> </div> <div style="width: 40%;"> <p>Turno: -</p> <p>Operador: -</p> <p>Supervisor: -</p> </div> </div> |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
| POTENCIA<br>FRECUENCIA<br>TIEMPO DE CALENTAMIENTO<br>TIEMPO DE ENFRIAMIENTO<br>RETARDO DE ENFRIAMIENTO<br>POSICIÓN DE CALENTAMIENTO<br>ROTACIÓN<br>CAUDAL DUCHA EXTERIOR<br>CAUDAL DUCHA INTERIOR<br>CAUDAL DUCHA AUXILIAR<br>CONCENTRACIÓN DEL QUENCH<br>TEMPERATURA DEL QUENCH<br>VELOCIDAD DE SCAN                                                                                                     | * (%) / Kw<br>KHz<br>Seg<br>Seg<br>Seg<br>In<br>RPM<br>+ GPM / LPM<br>+ GPM / LPM<br>+ GPM / LPM<br>%<br>°F<br>mm / seg | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">VASTAGO</th> <th style="text-align: center;">GUÍAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td style="text-align: center;">45%</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">106</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">2.2</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">4</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">2.2</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">5.373</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">300</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">17.4</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">18.3</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">29</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">16</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">84</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">N/A</td></tr> </tbody> </table> | VASTAGO | GUÍAS |  | 45% |  | 106 |  | 2.2 |  | 4 |  | 2.2 |  | 5.373 |  | 300 |  | 17.4 |  | 18.3 |  | 29 |  | 16 |  | 84 |  | N/A |
| VASTAGO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | GUÍAS                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 45%                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 106                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2.2                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 4                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2.2                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 5.373                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 300                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 17.4                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 18.3                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 29                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 16                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 84                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | N/A                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |
| _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura UDN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura CIDETECMA                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |       |  |     |  |     |  |     |  |   |  |     |  |       |  |     |  |      |  |      |  |    |  |    |  |    |  |     |

Figura 5.10 Apartado de los parámetros de liberación para el tratamiento térmico

La figura 5.11 muestra una hoja de liberación otorgada por el laboratorio metalográfico, en ella se puede ver las zonas que se especifica para la medición tanto de la zona efectiva de temple, como el análisis de la microestructura,

además de la dureza que se debe alcanzar en la zona “blanda” como en la zona endurecida.

**Protocolo de validación**

No. De Folio **E0001**

**PUESTA A PUNTO**

Fecha: \_\_\_\_\_

|                                 |                      |                                     |                   |                                         |
|---------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| PRESENTADO POR<br><b>Zampes</b> |                      | NO. DE MAQUINA<br><b>7-1149</b>     | TURNO<br><b>2</b> | FECHA DE ELABORACION<br><b>12-08-22</b> |
| NO DE PARTE<br><b>1047805</b>   | COLADA<br><b>M13</b> | MODELO<br><b>PHOENIX-0 SKS-1.33</b> |                   | U. NIVEL<br><b>6</b>                    |

CONDICION

CON REVENIDO ☒ **NO**

SIN REVENIDO ☐

CAMBIO DE MODELO ☐ CONTRIBUIDO ☐ AJUSTE ☒ **NO**

CAMBIO DE COLADA ☐ INTER. MTD ☐ PROTOTIPOS ☐

**CAMBIO DE INDUCTORES VASTAGO Y OLLA**

| VIA   | ESPECIFICADO |       | CLASE | DUREZA | VALOR MEDIO |
|-------|--------------|-------|-------|--------|-------------|
|       | Min          | Max   |       |        |             |
| VIA 1 | 1            | 5.7   | 5.2   | 2.1    | /           |
|       | 2            | 1.2   | —     | 2.4    | /           |
|       | 3            | 1.4   | —     | 3.2    | /           |
|       | 4            | —     | 2.0   | 3.5    | /           |
|       | 5            | 38.47 | 40.11 | 33.7   | /           |
| VIA 2 | 1            | 2.7   | 2.2   | 2.1    | /           |
|       | 2            | 1.3   | —     | 2.4    | /           |
|       | 3            | 1.4   | —     | 2.3    | /           |
|       | 4            | —     | 3.7   | 2.0    | /           |
|       | 5            | 38.88 | 40.08 | 38.1   | /           |
| VIA 3 | 1            | 58    | 62    | 54.3   | /           |
|       | 2            | 100   | 100   | 72.6   | /           |
|       | 3            | —     | —     | 88     | /           |

Profundidad de capa media 6 \_\_\_\_\_ 100 MPa

\* Valores de fuerza aplicados en el Plan de control

| VIA   | ESPECIFICADO |      | CLASE | DUREZA | VALOR MEDIO |
|-------|--------------|------|-------|--------|-------------|
|       | Min          | Max  |       |        |             |
| VIA 1 | 1            | 1.4  | 4.8   | 3.9    | /           |
|       | 2            | 1.4  | 4.0   | 2.0    | /           |
|       | 3            | 2.7  | 4.8   | 3.4    | /           |
|       | 4            | 2.7  | 4.8   | 3.8    | /           |
|       | 5            | 80.4 | 86.1  | 54.5   | /           |
| VIA 2 | 1            | 58   | 62    | 60.3   | /           |
|       | 2            | 100  | 100   | 72.9   | /           |
|       | 3            | 8.8  | —     | 6.5    | /           |

Profundidad de capa media 6 \_\_\_\_\_ 80 MPa

\* Valores de fuerza aplicados en el Plan de control

RESERVAZIONE E

|           |                |                  |                      |                   |
|-----------|----------------|------------------|----------------------|-------------------|
| RECHAZADO | ANALIZADOR     | HORA TERMINACION | FECHA DE TERMINACION | V. DEL SUPERVISOR |
| APROBADO  | <i>[Firma]</i> |                  |                      |                   |

NOMBRE/FIRMA  
Manufactura UDN

NOMBRE/FIRMA  
Manufactura CIDETECMA

Pag. 9

Figura 5.11 Hoja de liberación de la puesta a punto otorgada por el laboratorio metalográfico

Finalmente, la figura 5.12 es una hoja de resumen que integra toda la información de las etapas anteriormente presentadas, en este caso se concluye que el inductor implementado quedo aceptado y listo para la producción.

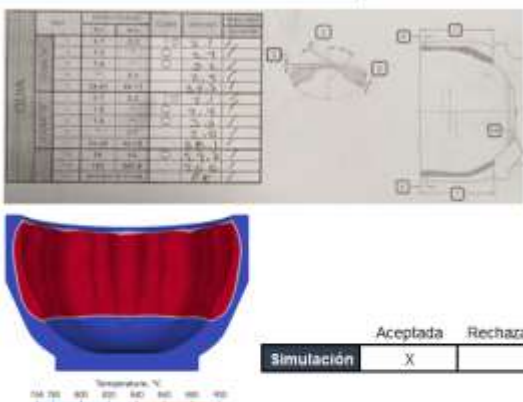
| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|-------|----------|------------|-----|------------|-----|-----|---------------|-----|-----|---------------------|-----|---|----------------------|-----|-----|-----------------|----|-------|----------|-----|-----|------------------|-------------|------|------------------|-------------|------|------------------|-------------|----|-----------------|---|----|-------------|----|----|----------------|----------|-----|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | No. De Folio: E0001                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| RESUMEN DE VALIDACIÓN DEL INDUCTOR PARA PRODUCCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Fecha:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| G 133 B L11-JF                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| DISEÑO DEL INDUCTOR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p>           Línea / UDN: <u>Línea 11 / Junta Fija</u><br/>           Máquina: <u>T-7249</u><br/>           No° de parte: <u>10476065</u><br/>           Tipo: <u>Guías/Single shot</u><br/>           Fabricación: <u>3D</u><br/>           Nivel: <u>Prototipo</u> </p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| IMPRESIÓN DEL INDUCTOR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           Autorizado <input checked="" type="checkbox"/><br/>           Rechazado <input type="checkbox"/> </div> <div style="width: 60%;"> <p><b>NOTAS:</b> De acuerdo a los resultados obtenidos por la simulación en Simufact Additive, es posible imprimir el inductor utilizando las orientación, configuración de soportes y parámetros sugeridos, utilizando un tratamiento térmico para reducir los esfuerzos térmicos residuales.</p> </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| PUESTA A PUNTO y SIMULACION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
|  <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           Simulación <input checked="" type="checkbox"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           Aceptada <input checked="" type="checkbox"/> Rechazada <input type="checkbox"/> </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="3">PARÁMETROS DE LIBERACION</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>GUIAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>POTENCIA</td> <td>+ (%) / Kw</td> <td>45%</td> </tr> <tr> <td>FRECUENCIA</td> <td>KHz</td> <td>106</td> </tr> <tr> <td>TIEMPO CALENT</td> <td>Seg</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>TIEMPO ENFRIAMIENTO</td> <td>Seg</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>RETARDO ENFRIAMIENTO</td> <td>Seg</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>POSICIÓN CALENT</td> <td>in</td> <td>5.373</td> </tr> <tr> <td>ROTACIÓN</td> <td>RPM</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>CAUDAL DUCHA EXT</td> <td>+ GPM / LPM</td> <td>17.4</td> </tr> <tr> <td>CAUDAL DUCHA INT</td> <td>+ GPM / LPM</td> <td>18.3</td> </tr> <tr> <td>CAUDAL DUCHA AUX</td> <td>+ GPM / LPM</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>CONCENT: QUENCH</td> <td>%</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>TEMP QUENCH</td> <td>°F</td> <td>84</td> </tr> <tr> <td>VELOCIDAD SCAN</td> <td>mm / seg</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> | PARÁMETROS DE LIBERACION |  |  |  |  | GUIAS | POTENCIA | + (%) / Kw | 45% | FRECUENCIA | KHz | 106 | TIEMPO CALENT | Seg | 2.2 | TIEMPO ENFRIAMIENTO | Seg | 4 | RETARDO ENFRIAMIENTO | Seg | 2.2 | POSICIÓN CALENT | in | 5.373 | ROTACIÓN | RPM | 300 | CAUDAL DUCHA EXT | + GPM / LPM | 17.4 | CAUDAL DUCHA INT | + GPM / LPM | 18.3 | CAUDAL DUCHA AUX | + GPM / LPM | 29 | CONCENT: QUENCH | % | 16 | TEMP QUENCH | °F | 84 | VELOCIDAD SCAN | mm / seg | N/A |
| PARÁMETROS DE LIBERACION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | GUIAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| POTENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | + (%) / Kw                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 45%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| FRECUENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | KHz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 106                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| TIEMPO CALENT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Seg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| TIEMPO ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Seg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| RETARDO ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Seg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| POSICIÓN CALENT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | in                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5.373                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| ROTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | RPM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 300                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| CAUDAL DUCHA EXT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | + GPM / LPM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 17.4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| CAUDAL DUCHA INT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | + GPM / LPM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 18.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| CAUDAL DUCHA AUX                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | + GPM / LPM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 29                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| CONCENT: QUENCH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 16                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| TEMP QUENCH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | °F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 84                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| VELOCIDAD SCAN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | mm / seg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | N/A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           Validación: <input checked="" type="checkbox"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           Aceptada <input checked="" type="checkbox"/> Rechazada <input type="checkbox"/> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="width: 45%; text-align: center;">           NOMBRE/FIRMA<br/>           Manufactura UDN         </div> <div style="width: 45%; text-align: center;">           NOMBRE/FIRMA<br/>           Manufactura CIDETECMA         </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |  |  |  |  |       |          |            |     |            |     |     |               |     |     |                     |     |   |                      |     |     |                 |    |       |          |     |     |                  |             |      |                  |             |      |                  |             |    |                 |   |    |             |    |    |                |          |     |

Figura 5.12 Resumen de la validación de la implementación de un inductor fabricado con tecnología aditiva

Posterior a la implementación del inductor y comienzo de la producción se realizó un seguimiento sobre la variación de los parámetros de trabajo liberados para lograr el temple correcto de las piezas (juntas fijas), ya que cada 8 hrs se realiza una medición de las propiedades del temple, si esta evaluación es rechazada se ajustan los parámetros para volver a estar dentro de la tolerancia de las mediciones.

En la figura 5.13 se muestra el histórico de alrededor de 3 meses de seguimiento, la primer grafica corresponde al nivel de potencia representado en porcentaje donde se puede ver que hubo aumento en este conforme fue avanzando la producción.

La segunda muestra el tiempo de calentamiento necesario para lograr las propiedades del tratamiento térmico, estos dos primeros parámetros graficados definen el consumo energético mediante la siguiente relación:

$$\text{Energía suministrada} = \text{Potencia} * \text{Tiempo de calentamiento} \quad \text{Ec.5.1}$$

Por lo cual se puede decir que la energía suministrada permanecía casi constante ya que mientras la potencia utilizada subía en valor el tiempo de calentamiento bajaba, esto fue una tendencia a lo largo de la producción, lo que podría indicar que estas variaciones respondieron a un desgaste de la bobina debido al uso.

El tercer parámetro graficado es la posición del inductor, esto define la posición relativa entre el inductor y la pieza, la cual fue aumentando hasta llegar a cierta posición donde se quedó más estable con pequeñas variaciones.

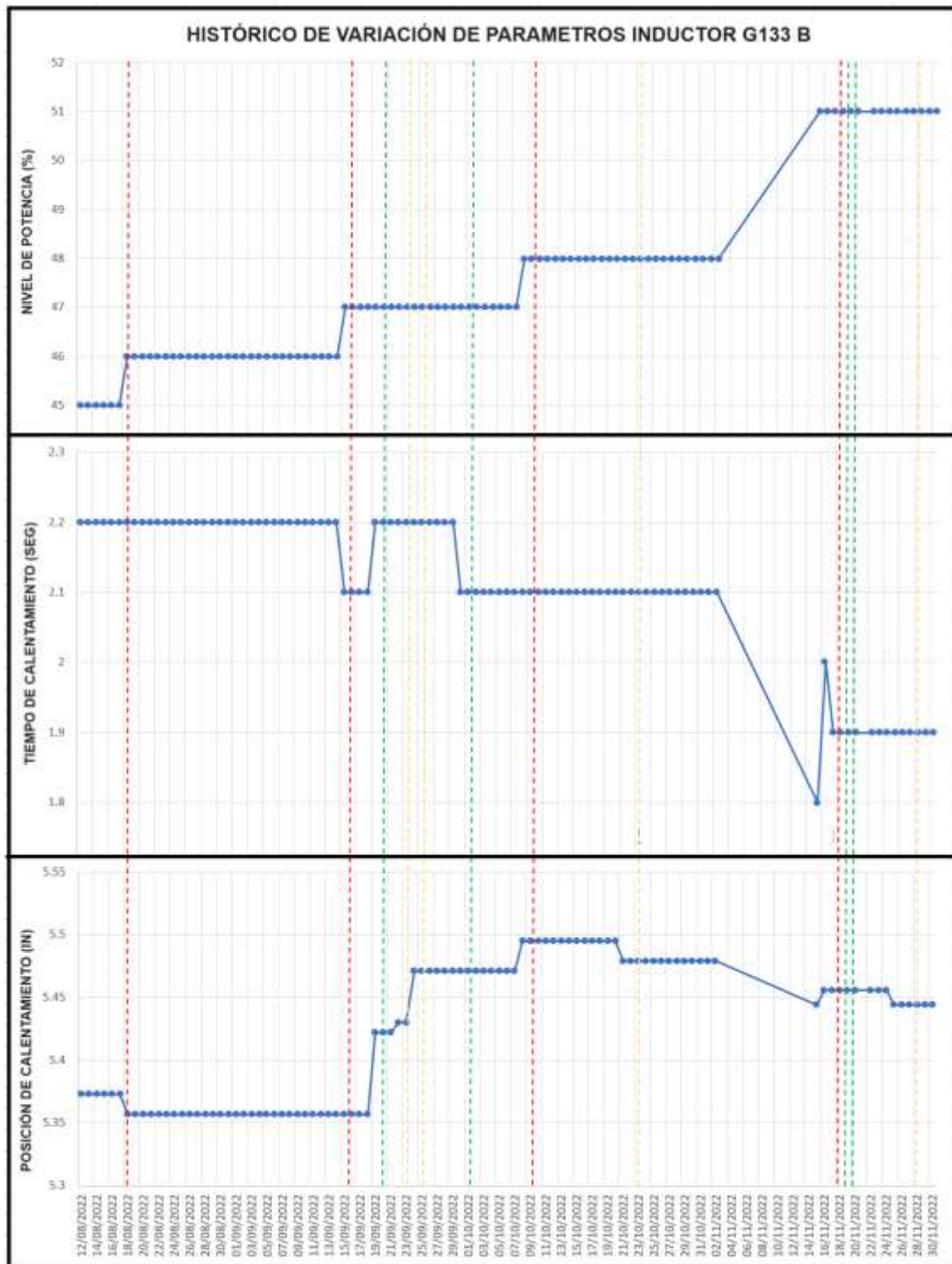


Figura 5.13 Histórico de variación de de parámetros de trabajo de un inductor de fabricación aditiva

También se realizó una medición sobre la bobina de fabricación aditiva, esto para observar su desgaste cada cierto tiempo, se trató de realizar cada 40,000 piezas producidas, pero debido a temas de producción en ciertos periodos se retrasó.

En la figura 4.14 se muestra los resultados de cada medición en comparación con la producción que es la forma de medir la vida útil de la bobina. En dicha grafica se observa que en las primeras 3 mediciones el diámetro se reduce de manera pronunciada en comparación con la medida obtenida en la 4ta medición, aun así, el desgaste contra las medidas originales es significativo en comparación con el grosor de la pared del inductor.

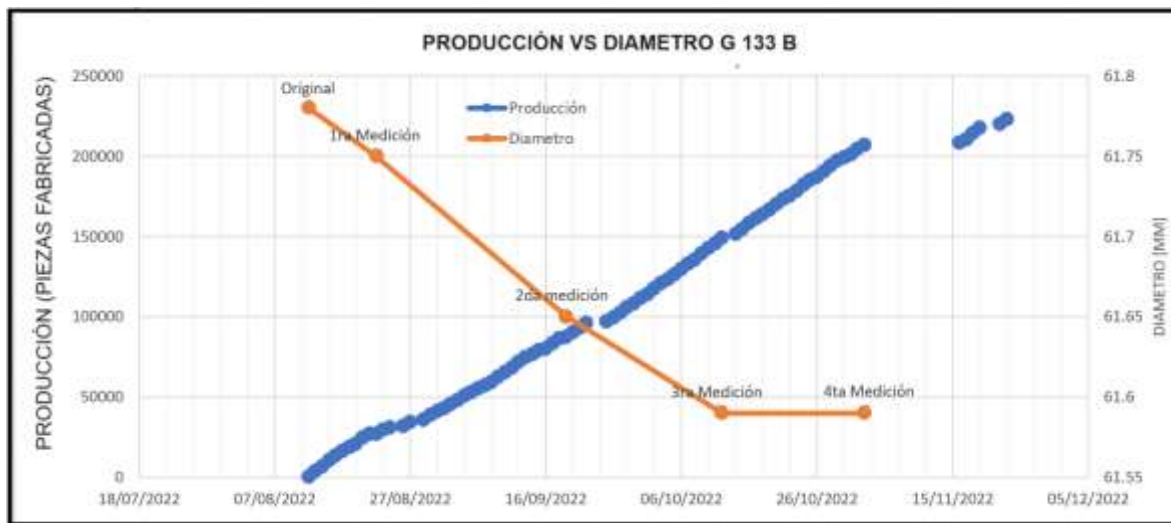


Figura 5.14 Comparación del diámetro de un inductor fabricado con tecnología aditiva a lo largo de su producción

La figura 5.15 muestra otro estudio realizado sobre la bobina a lo largo de su vida útil, esta vez sobre la rugosidad que presentaba, se puede observar que la rugosidad en la primera y segunda medición se redujo drásticamente en comparación con las demás, con ello se puede decir que se aliso conforme aumento la producción.

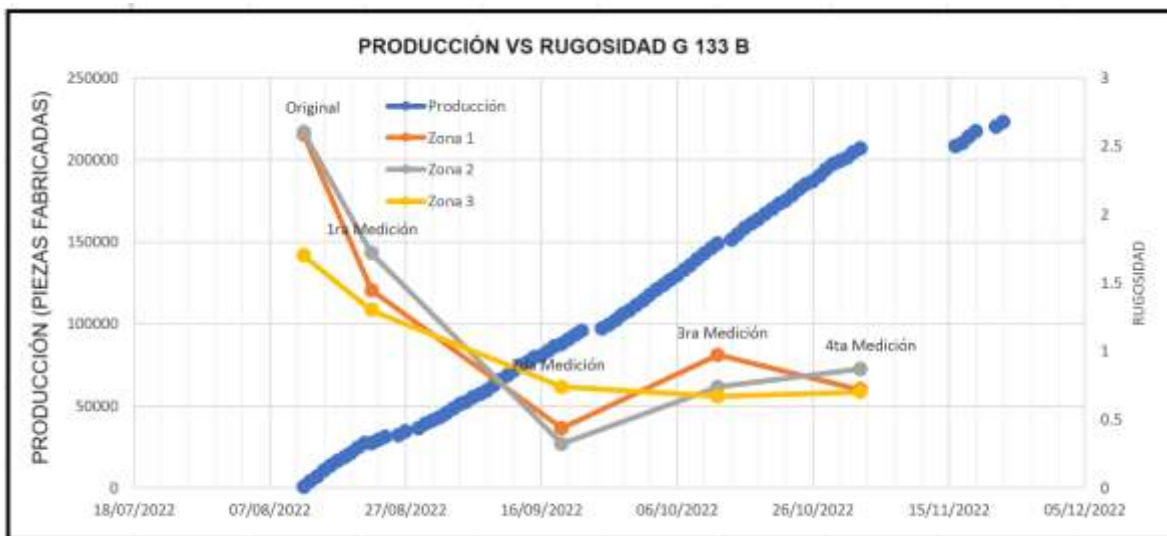


Figura 5.15 Comparación del diámetro de un inductor fabricado con tecnología aditiva a lo largo de su producción

## Conclusión

El desarrollo e implementación de la metodología planteada a lo largo de la presente tesis permite obtener resultados favorables para validación del proceso de implementación de los inductores, cuya fabricación se pretende migrar de los procesos convencionales a la manufactura aditiva, esto mediante la puesta a punto del proceso de tratamiento térmico en la zona “guías” del componente “junta fija”, el cual es un elemento de las flechas de velocidad constante producidas por la empresa.

Lo anterior resulta en un proceso de implementación de inductores eficiente, que promueve la productividad, además que se reduce el tiempo necesario desde el desarrollo hasta su puesta a punto ya que dicha metodología además de validar la implementación del proceso, guía las acciones de desarrollo durante cada una de las etapas y disminuye el riesgo de errores antes de que el inductor se someta a las pruebas reales en líneas de producción.

El uso y llenado del protocolo de validación como herramienta de la metodología corrobora el cumplimiento de los requisitos durante cada una de las etapas de desarrollo del inductor y además sirve como evidencia de la correcta implementación de este.

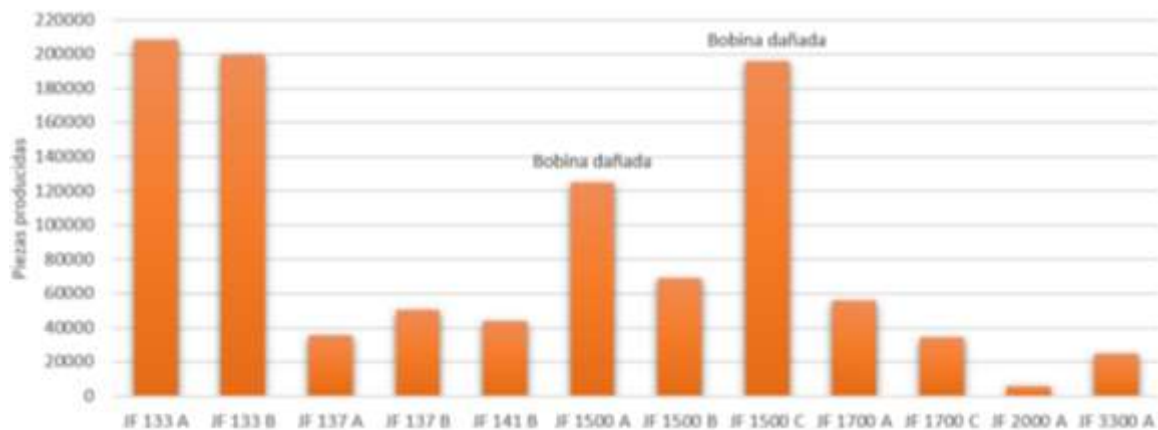
De igual manera se puede establecer el cumplimiento de los objetivos específicos, ya que al obtener resultados positivos en la corrida del prototipo se justifica que con el diseño propuesto y su posterior fabricación mediante impresión 3D, es posible obtener una capa efectiva de temple en la zona requerida que cumpla con las especificaciones de los estándares de la empresa, en cuanto a dimensiones, valores de dureza y microestructura.

El uso de la simulación para el tratamiento térmico resulta también en una herramienta muy útil para la comparación de los resultados obtenidos de manera real contra los obtenidos en el software, además que estos últimos también funcionan como punto de partida para la puesta a punto del proceso.

## Trabajos Futuros

Para los trabajos futuros queda el seguimiento de la vida de los inductores una vez que se concluya su validación del proceso de desarrollo, es decir el número de piezas que se pueden producir con cada inductor fabricado mediante la impresión 3D antes de que falle, esto con la finalidad de determinar la durabilidad de estos y compararla con la durabilidad de los inductores fabricados con manufactura aditiva y así determinar si es redituable la implementación de esta tecnología.

Durante el tiempo de desarrollo del proyecto se realizó un seguimiento de las bobinas de impresión 3D que ya estaban trabajando en el proceso de tratamiento térmico, los resultados se muestran en la gráfica siguiente, hasta el momento de finalización del proyecto se tienen dos bobinas que ya salieron de producción, para realizar una primera comparación con las bobinas de fabricación tradicional, estas tienen una vida útil de alrededor de 80,000 piezas.



Número de piezas tratadas térmicamente al momento de finalizar el proyecto (Los números de parte se modificaron por temas de confidencialidad).

El seguimiento de la vida de cada inductor, hasta su retiro de la producción, sirve para incluirse en el protocolo de validación obteniendo así la información desde su creación hasta el momento de deshecho, esto servirá en futuros diseños a forma de retroalimentación.

## Referencias

- [1] Haimbaugh E. R., Practical Induction Heat Treating, USA. ASM International, Agosto de 2015.
- [2] Strakova M. N., Eimuss A., Geza V., Scepanskis M., Hellriegel M., Does 3D-Printed coil perform better for induction hardening and how to predict the performance based on numerical simulation, America's Center, St Louis, Missouri USA, Septiembre de 2021.
- [3] Olsen C., Ivanov D., Lifetime enhancement of induction heating Coils: A complex approach based on numerical simulations and 3D-Printing., 27Th IFHTSE congress & European conference on heat treatment 2022, Septiembre de 2022.
- [4] Chang Y. P., Wang H. Y., Chou H. M., A novel application on the drive elements of using electrical contact resistance and friction coefficient for evaluating induction heat treatment, Departament of Mechanical Engineering, Kun Shan University, Febrero de 2021.
- [5] Kusmoko A., Dunne D. P., Dahar R. Li H., Surface treatment evaluation of induction hardening and tempered 1045 steel, Faculty of Engineering and Information Sciences, UNIVERISTY OF WOLLONGONG AUSTRALIA, 2014.
- [6] Heisler H. Advanced Vehicle Technology, Willesden Centre, London UK, 2002.
- [7] American Society for Metals, Vol 1 Propierties and Selection: Irons, Steel and High-Performace Alloys, 1990.
- [8] American Society for Metals, Heat Treating, Vol 4, Metals Handbook, 1981.
- [9] Unterweiser P. M., Boyer H. E., Kubbs J. J., Heat treater's guide: standar practices and procedures for steel, American Society for Metals, 1982.
- [10] Totten G. E. STEEL HEAT TREATMENT, Equipment and process design, Portland Oregon U.S.A. 2006.
- [11] Kehl G. L., Te Pricipes of Metallographic Laboratory Practice, 1949.
- [12] Samuels L. E., Light Microscopy of Carbon Steels, ASM International, 1999.

- [13] Lupi S., Rudnev V. Electromagnetic and Thermal Properties of Materials, 2014.
- [14] Tudbury C. A, Basics of induction Heating, University of Minnesota, 1960.
- [15] Incropera F. P., De Witt D. P., Fundamentos de transferencia de calor, School of mechanical Engineering Purdue University, 1999.
- [16] Rudnev V., Loveless D., Cook R. L., Power Supplies for Modern Induction Heating, 2017.
- [17] Semiatin S. L., Stutz D. E., Induction Heat Treatment of Steel, American Society For Metals Ohio 1986.
- [18] (AM) Diegel O., Nordin A., Motte D. A practical guide to design for additive manufacturing, Skåne Län, Sweden, 2020.
- [19] (Copper) Davis J. R., ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloy, United States of America, 2001.

# ANEXOS

## ANEXO A Hoja de solicitud de diseño

| Protocolo de validación                           |                               | No. De Folio                                   |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>DISEÑO DE INDUCTOR</b>                         |                               | E0001                                          |
|                                                   |                               | <b>Tipo de Inductor</b>                        |
| UDN: _____                                        | Vástago <input type="text"/>  | SCAN <input type="text"/>                      |
| Línea: _____                                      | Guías <input type="text"/>    | Single Shot <input type="text"/>               |
| Máquina: _____                                    | Revenido <input type="text"/> |                                                |
| Número de parte: _____                            | Pista <input type="text"/>    |                                                |
| Tipo de acero: _____                              | <b>Tipo de Fabricación</b>    |                                                |
| STD GKN referido: _____                           | Conv. <input type="text"/>    | Activa <input type="text"/>                    |
| Código de inductor: _____                         | Nivel: _____                  |                                                |
| Número de refacciones: _____                      |                               |                                                |
| <h1>AGREGAR PLANO<br/>DEL INDUCTOR</h1>           |                               |                                                |
| _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura UDN          |                               | _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Manufactura CIDETECMA |
| _____<br>NOMBRE/FIRMA<br>Presetting de Inductores |                               |                                                |

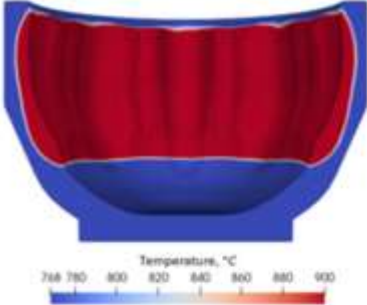
## ANEXOS

### ANEXO B Hoja de resultado de Simulación de TT 1/2

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------|-------|------------------|--|--------------|--|--------------------------|--|-------------------------|--|-----------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--|--|--|--|--|-----|-----|-------|--------|---|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|--------|---|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|--|---|--|--|--|
| <b>SIMULACIÓN CENOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     | Id. De Folio <b>E0001</b>   |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>             Fecha: _____<br/>             Código de inductor: _____<br/>             Solicitado por: _____           </div> <div>             Inductor de serie: <input style="width: 50px;" type="text"/><br/>             Inductor prototipo: <input style="width: 50px;" type="text"/><br/>             Analizado por: _____           </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #2c3e50; color: white;">Parámetros sugeridos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">Capacidad de generador (Kv)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Frecuencia (KHz)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Potencia (%)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Tiempo Calentamiento (s)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Tiempo Enfriamiento (s)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Velocidad de rotación (rpm)</td><td></td></tr> </tbody> </table> | Parámetros sugeridos                                                                                                                                                                                                                                                                  |     | Capacidad de generador (Kv) |       | Frecuencia (KHz) |  | Potencia (%) |  | Tiempo Calentamiento (s) |  | Tiempo Enfriamiento (s) |  | Velocidad de rotación (rpm) |  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="background-color: #2c3e50; color: white;">Dimensiones obtenidas en simulacion</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th style="text-align: center;">MIN</th> <th style="text-align: center;">MAX</th> <th style="text-align: center;">GUIAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5" style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center;">GUIA A</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="4" style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center;">GUIA B</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | Dimensiones obtenidas en simulacion |  |  |  |  |  | MIN | MAX | GUIAS | GUIA A | 1 |  |  |  | 2 |  |  |  | 3 |  |  |  | 4 |  |  |  | 5 |  |  |  | GUIA B | 1 |  |  |  | 2 |  |  |  | 3 |  |  |  | 6 |  |  |  |  | 7 |  |  |  |
| Parámetros sugeridos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Capacidad de generador (Kv)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Frecuencia (KHz)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Potencia (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Tiempo Calentamiento (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Tiempo Enfriamiento (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Velocidad de rotación (rpm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| Dimensiones obtenidas en simulacion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                       | MIN | MAX                         | GUIAS |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| GUIA A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| GUIA B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| <div style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">GUIA A</div> <div style="text-align: center; font-size: 2em; color: #ccc; padding: 50px 0;">             AGREGAR IMAGEN<br/>DE LA SIMULACION<br/>GUIA A           </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <div style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">GUIA B</div> <div style="text-align: center; font-size: 2em; color: #ccc; padding: 50px 0;">             AGREGAR IMAGEN<br/>DE LA SIMULACION<br/>GUIA A           </div> |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |
| <b>Conclusiones:</b><br><div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div>             Autorizado <input style="width: 50px;" type="text"/> Rechazado <input style="width: 50px;" type="text"/> </div> <div>             Autorizado por: _____<br/> <small>NOMBRE/FIRMA</small> </div> </div>              |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |                             |       |                  |  |              |  |                          |  |                         |  |                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |  |  |  |  |  |     |     |       |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |        |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |   |  |  |  |  |   |  |  |  |

## ANEXOS

### ANEXO B Hoja de resultado de Simulación de TT 2/2

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------|----------------|-------|--------|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|--------|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|
| Id. De Folio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                   |                                                               | E0001                                                                               |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| <b>SIMULACIÓN CENOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| Fecha: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                   | Codigo de inductor: _____                                     |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| Inductor de serie: <input style="width: 50px;" type="text"/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                   | Inductor prototipo: <input style="width: 50px;" type="text"/> |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| Solicitado por: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                   | Analizado por: _____                                          |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| <b>PERFIL DE ENDURECIMIENTO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| GUIA A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | GUIA B                                                        |  |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| <b>GRADIENTE DE TEMPERATURA</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|  <p style="text-align: center; font-size: small;">Temperature, °C<br/>768 780 800 820 840 860 880 900</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| <b>CÁLCULO DE ERROR DE LA SIMULACION VS REALIDAD</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                   |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse; width: 80%;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">No*</th> <th style="width: 15%;">Medidas simulacion</th> <th style="width: 15%;">Medidas reales</th> <th style="width: 15%;">Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5" style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center;">Guia A</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="5" style="background-color: #2c3e50; color: white; text-align: center;">Guia B</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> |                                                                                   |                                                               |                                                                                     | No* | Medidas simulacion | Medidas reales | Error | Guia A | 1 |  |  | 2 |  |  | 3 |  |  | 4 |  |  | 5 |  |  | Guia B | 1 |  |  | 2 |  |  | 3 |  |  | 6 |  |  | 7 |  |  |
| No*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Medidas simulacion                                                                | Medidas reales                                                | Error                                                                               |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| Guia A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 4                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 5                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
| Guia B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 6                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 7                                                                                 |                                                               |                                                                                     |     |                    |                |       |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |        |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |

## ANEXOS

### ANEXO C Hoja de resultado de impresión 3D 1/2

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|--|-----------|--|--------------|--|----------------------|--|-----------------|--|-------------------|----------------|---------------------|--|---------------------------|--|------|-------------|---------------|--|------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------|--|---------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | No. De Folio <b>E0001</b> |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; font-weight: bold;">FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>             Fecha: _____<br/>             Código de inductor: _____<br/>             Solicitado por: _____           </div> <div>             Inductor de serie: <input style="width: 50px;" type="text"/><br/>             Inductor prototipo: <input style="width: 50px;" type="text"/><br/>             Analizado por: _____           </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| <div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block; font-weight: bold;">Posición sugerida de impresión</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| <div style="float: right; width: 30%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: #333; color: white;"> <th colspan="2">Parámetros sugeridos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Power (W)</td><td></td></tr> <tr><td>Speed (mm/s)</td><td></td></tr> <tr><td>Layer thickness (mm)</td><td></td></tr> <tr><td>Recoat time (s)</td><td></td></tr> <tr><td>Scanning strategy</td><td>Unidireccional</td></tr> <tr><td>Hatch distance (mm)</td><td></td></tr> </tbody> </table> <br/> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: #333; color: white;"> <th colspan="2">Configuración de soportes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tipo</td> <td>Cilíndricos</td> </tr> <tr><td>Diámetro (mm)</td><td></td></tr> <tr><td>Distancia de separación (mm)</td><td></td></tr> <tr><td>Volumen total de soportes (cm³)</td><td></td></tr> <tr><td>Masa para soportes (g)</td><td></td></tr> </tbody> </table> <br/> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>Tiempo de Impresión</td> <td></td> </tr> </table> </div> <div style="clear: both;"></div> <div style="margin-top: 20px;"> <b>Conclusiones:</b><br/> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px;"></div> </div> <div style="margin-top: 20px; display: flex; justify-content: space-between;"> <div>             Autorizado: <input style="width: 50px;" type="text"/> Rechazado: <input style="width: 50px;" type="text"/> </div> <div>             Autorizado por: _____<br/>             NOMBRE/FIRMA           </div> </div> |                           | Parámetros sugeridos |  | Power (W) |  | Speed (mm/s) |  | Layer thickness (mm) |  | Recoat time (s) |  | Scanning strategy | Unidireccional | Hatch distance (mm) |  | Configuración de soportes |  | Tipo | Cilíndricos | Diámetro (mm) |  | Distancia de separación (mm) |  | Volumen total de soportes (cm³) |  | Masa para soportes (g) |  | Tiempo de Impresión |  |
| Parámetros sugeridos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Power (W)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Speed (mm/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Layer thickness (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Recoat time (s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Scanning strategy                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Unidireccional            |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Hatch distance (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Configuración de soportes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Tipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Cilíndricos               |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Diámetro (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Distancia de separación (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Volumen total de soportes (cm³)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Masa para soportes (g)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Tiempo de Impresión                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |
| Pag. 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                           |                      |  |           |  |              |  |                      |  |                 |  |                   |                |                     |  |                           |  |      |             |               |  |                              |  |                                 |  |                        |  |                     |  |

## ANEXOS

## ANEXO C Hoja de resultado de impresión 3D 2/2

| Protocolo de validación      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | No. De Folio <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">E0001</span> |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| FACTIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D | Fecha: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                  |
| Distorsión                   | <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> |                                                                                  |
| Esfuerzos residuales         | <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div>                                                                                       |                                                                                  |
| Densidad                     | <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div>                                                                                       |                                                                                  |

## ANEXOS

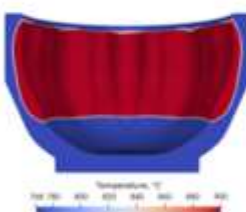
### ANEXO D Hoja de parámetros para tratamiento térmico

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                   |             |                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|-------|
| PARAMETROS DE LIBERACIÓN                                                                                                                                                                                                                  |             | Id. De Folio E0001                                      |       |
| <p>Unidad de negocio: _____</p> <p>Línea: _____</p> <p>Máquina: _____</p><br><p>Número de parte: _____</p> <p>Tipo de acero: _____</p> <p>STD GKN referido: _____</p> <p>Turno: _____</p> <p>Operador: _____</p> <p>Supervisor: _____</p> |             |                                                         |       |
| **DATOS DE LIBERACIÓN                                                                                                                                                                                                                     |             |                                                         |       |
|                                                                                                                                                                                                                                           |             | VASTAGO                                                 | GUÍAS |
| POTENCIA                                                                                                                                                                                                                                  | + (%) / Kw  |                                                         |       |
| FRECUENCIA                                                                                                                                                                                                                                | KHz         |                                                         |       |
| TIEMPO DE CALENTAMIENTO                                                                                                                                                                                                                   | Seg         |                                                         |       |
| TIEMPO DE ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                    | Seg         |                                                         |       |
| RETARDO DE ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                   | Seg         |                                                         |       |
| POSICIÓN DE CALENTAMIENTO                                                                                                                                                                                                                 | In          |                                                         |       |
| ROTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                  | RPM         |                                                         |       |
| CAUDAL DUCHA EXTERIOR                                                                                                                                                                                                                     | + GPM / LPM |                                                         |       |
| CAUDAL DUCHA INTERIOR                                                                                                                                                                                                                     | + GPM / LPM |                                                         |       |
| CAUDAL DUCHA AUXILIAR                                                                                                                                                                                                                     | + GPM / LPM |                                                         |       |
| CONCENTRACIÓN DEL QUENCH                                                                                                                                                                                                                  | %           |                                                         |       |
| TEMPERATURA DEL QUENCH                                                                                                                                                                                                                    | °F          |                                                         |       |
| VELOCIDAD DE SCAN                                                                                                                                                                                                                         | mm / seg    |                                                         |       |
| <p>_____<br/>NOMBRE/FIRMA<br/>Manufactura UDN</p>                                                                                                                                                                                         |             | <p>_____<br/>NOMBRE/FIRMA<br/>Manufactura CIDETECMA</p> |       |

Pag. 6

## ANEXOS

### ANEXO E Hoja de resumen de la validación de un inductor de impresión 3D

| Protocolo de validación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|----------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--|--|------------|--|-----------|----------|-----------|--|------------|-----|--|----------------|-----|--|---------------------|-----|--|----------------------|-----|--|-----------------|----|--|----------|-----|--|------------------|-------------|--|------------------|-------------|--|------------------|-------------|--|-----------------|---|--|-------------|----|--|----------------|----------|--|
| <b>RESUMEN DE VALIDACIÓN DEL INDUCTOR PARA PRODUCCIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |             | No. De Folio: E0001          |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |             | Fecha: _____                 |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <b>DISEÑO DEL INDUCTOR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Línea / UDN: _____<br>Máquina: _____<br>No. de parte: _____<br>Tipo: _____<br>Fabricación: _____<br>Nivel: _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             | AGREGAR PLANO                |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <b>IMPRESIÓN DEL INDUCTOR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |             | NOTAS:                       |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 35%; text-align: center;">Aceptado</th> <th style="width: 35%; text-align: center;">Rechazado</th> </tr> <tr> <td>Distorsión</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Esfuerzos</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Densidad</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <div style="margin-top: 5px;">             Tiempo de impresión: _____           </div> <div style="margin-top: 5px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Autorizado</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rechazado</td> <td></td> </tr> </table> </div>                            |             |                              | Aceptado | Rechazado | Distorsión  |           |            | Esfuerzos |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Densidad                 |  |  | Autorizado |  | Rechazado |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Aceptado    | Rechazado                    |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Distorsión                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Esfuerzos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Densidad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Autorizado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Rechazado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <b>PUESTA A PUNTO y SIMULACION</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <div style="text-align: center; font-size: 1.5em; color: gray;">AGREGAR PUESTA A PUNTO</div> <div style="margin-top: 20px;">  <div style="margin-left: 10px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Promedio de error Simulación</td> <td></td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Aceptada</td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Rechazada</td> </tr> <tr> <td>Simulación</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </div> </div> |             | Promedio de error Simulación |          |           | Aceptada    | Rechazada | Simulación |           |  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center;">PARÁMETROS DE LIBERACION</th> </tr> <tr> <th style="width: 40%;"></th> <th style="width: 20%;"></th> <th style="width: 40%; text-align: center;">GUIAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>POTENCIA</td><td>+ D3 / Kw</td><td></td></tr> <tr><td>FRECUENCIA</td><td>KHz</td><td></td></tr> <tr><td>TIEMPO CALENT.</td><td>Seg</td><td></td></tr> <tr><td>TIEMPO ENFRIAMIENTO</td><td>Seg</td><td></td></tr> <tr><td>RETARDO ENFRIAMIENTO</td><td>Seg</td><td></td></tr> <tr><td>POSICIÓN CALENT</td><td>In</td><td></td></tr> <tr><td>ROTACIÓN</td><td>RPM</td><td></td></tr> <tr><td>CAUDAL DUCHA EXT</td><td>+ GPM / LPM</td><td></td></tr> <tr><td>CAUDAL DUCHA INT</td><td>+ GPM / LPM</td><td></td></tr> <tr><td>CAUDAL DUCHA AUX</td><td>+ GPM / LPM</td><td></td></tr> <tr><td>CONCENT. QUENCH</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>TEMP QUENCH</td><td>°F</td><td></td></tr> <tr><td>VELOCIDAD SCAN</td><td>mm / seg</td><td></td></tr> </tbody> </table> | PARÁMETROS DE LIBERACION |  |  |            |  | GUIAS     | POTENCIA | + D3 / Kw |  | FRECUENCIA | KHz |  | TIEMPO CALENT. | Seg |  | TIEMPO ENFRIAMIENTO | Seg |  | RETARDO ENFRIAMIENTO | Seg |  | POSICIÓN CALENT | In |  | ROTACIÓN | RPM |  | CAUDAL DUCHA EXT | + GPM / LPM |  | CAUDAL DUCHA INT | + GPM / LPM |  | CAUDAL DUCHA AUX | + GPM / LPM |  | CONCENT. QUENCH | % |  | TEMP QUENCH | °F |  | VELOCIDAD SCAN | mm / seg |  |
| Promedio de error Simulación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Aceptada    | Rechazada                    |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Simulación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| PARÁMETROS DE LIBERACION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |             | GUIAS                        |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| POTENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | + D3 / Kw   |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| FRECUENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | KHz         |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| TIEMPO CALENT.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Seg         |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| TIEMPO ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Seg         |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| RETARDO ENFRIAMIENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Seg         |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| POSICIÓN CALENT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | In          |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| ROTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | RPM         |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| CAUDAL DUCHA EXT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | + GPM / LPM |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| CAUDAL DUCHA INT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | + GPM / LPM |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| CAUDAL DUCHA AUX                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | + GPM / LPM |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| CONCENT. QUENCH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | %           |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| TEMP QUENCH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | °F          |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| VELOCIDAD SCAN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | mm / seg    |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Aceptada</td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Rechazada</td> </tr> <tr> <td>Validación:</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |             |                              | Aceptada | Rechazada | Validación: |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Aceptada    | Rechazada                    |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| Validación:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">             NOMBRE/FIRMA<br/>             Manufactura UDN           </div> <div style="width: 45%;">             NOMBRE/FIRMA<br/>             Manufactura CIDETECMA           </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |             |                              |          |           |             |           |            |           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |  |  |            |  |           |          |           |  |            |     |  |                |     |  |                     |     |  |                      |     |  |                 |    |  |          |     |  |                  |             |  |                  |             |  |                  |             |  |                 |   |  |             |    |  |                |          |  |



# CERTIFICATE

## OF PARTICIPATION

This certificate is presented to:

**Luis Enrique Llamas, Luis Daniel Aguilera Camacho, José Antonio Torres**

for presenting the contribution "Metodología de validación del proceso de desarrollo de inductores mediante manufactura aditiva, para tratamiento térmico" at the International Mechanical Science Congress, held at the Tecnológico Nacional de México en Celaya (TecNM), Mexico, 8 - 10 February 2023.



**February 10, 2023**



**DR. KARLA ANHEL CAMARILLO GÓMEZ**  
DEPARTMENT METAL-MECHANICS  
**TecNM in Celaya**



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
en Celaya

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECANICA





# Validation methodology of the inductor development process through additive manufacturing for heat treatment

LUIS E. LLAMAS, LUIS D. AGUILERA, JOSÉ A. TORRES  
M2103065@ITCELAYA.EDUMX

## ABSTRACT

The introduction of the manufacture of inductors by additive manufacturing, used for the processes of heat treatment by induction of the constant velocity joints components, represents a useful tool for solving problems, specifically, in the manufacture of copper coils, necessary for the application of this method. For the correct development of the process, it is necessary to develop a methodology that allows validating the coil development process.

## INDUCTION HEAT TREATMENT

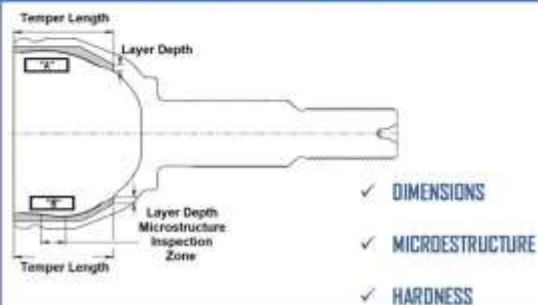
Is a process based on induction heating, which is an electromagnetic phenomenon that occurs when feeding a copper coil with an electric current, this produces a magnetic field that induces heating in the metallic component.



## METHODOLOGY



## METALLOGRAPHIC ANALYSIS



## APPLICATION

### COMPONENTS OF CONSTANT VELOCITY JOINTS WITH INDUCTION HARDENING





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
**A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA**

Otorga el presente reconocimiento a

**Ing. Luis Enrique Llamas Loredo**

Por su participación como PONENTE en la Semana Lince 2023, dentro del marco del 65 aniversario del Tecnológico Nacional de México en Celaya, celebrada los días 19, 20 y 21 de Abril con el tema.

*Aplicación de la manufactura aditiva para el tratamiento térmico dentro de la industria*

ATTE.



**MGA Ernesto Lago Ledesma**  
Director



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
en Celaya

**Celaya, Guanajuato a 21 de Abril de 2023**

**DIRECCIÓN**



**SEMANA LINCE**

**100% PLÁSTICO**





GKN Driveline Celaya  
Carretera Panamericana km 284 SN  
C.P. 38110  
Celaya Gto., México  
Tel + 52 (461) 618 5397  
Fax + 52 (461) 618 5390

Celaya, Guanajuato, 30 de Diciembre del 2022

**C. ERNESTO LUGO LEDESMA**  
**DIRECTOR DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**  
**P R E S E N T E**

Por este medio me permito informarle que el **C. Llamas Loredo Luis Enrique** de la carrera de **MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA** con número de control **M2103065** concluyó sus prácticas profesionales vinculadas con el **TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**, por un periodo del **14 DE FEBRERO DEL 2022 AL 30 DE DICIEMBRE DEL 2022** en el área de **CIDETECMA** a cargo de **M.C. José Antonio Torres Castillo**. Obteniendo una calificación aprobatoria en la evaluación de su desempeño.

Sin más por el momento me despido de usted y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración.

**ATENTAMENTE**

GKN Driveline Celaya, S. de RL de CV  
RECURSOS HUMANOS  
RFC: GILV40816T21  
**Lic. Hernández**  
Entrenamiento Especialista

Registrado en Londres bajo el No 34104  
Oficina de registro: Ipsley House  
Ipsley Church Lane, Redditch  
Worcestershire B98 0WR, Reino Unido

EXPECT > MORE