



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Zitácuaro



# TITULACIÓN INTEGRAL TESIS PROFESIONAL

DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN  
CUARTO DE SECADO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

DIEGO DEL RÍO ZANATTA

No. DE CONTROL: 14650186

ASESOR:

MTRO. LUIS ALBERTO QUIROZ GRANADOS

H. ZITÁCUARO, MICH. OCTUBRE DE 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme todo lo necesario en la vida para poder llegar a la etapa en la que me encuentro ahora.

De manera muy especial a mis padres, mis abuelos y mi hermano por el apoyo incondicional en todo momento.

A los ingenieros Juvenal Juárez, Luis Antonio Sánchez y Luis Alberto Quiroz, quienes compartieron su conocimiento y me guiaron en el desarrollo del proyecto.

Al Instituto Tecnológico de Zitácuaro que me permitió formarme académica y profesionalmente.

## ÍNDICE

Índice.....	III
Resumen .....	VIII
Introducción .....	IX
Capítulo I .....	11
1. Marco de referencia.....	12
1.1 Generalidades de la empresa.....	12
1.1.1 Misión y visión .....	12
1.1.2 Política de calidad .....	12
1.1.3 Objetivo .....	13
1.1.4 Valores .....	13
1.1.5 Servicios.....	13
1.1.6 Organigrama.....	14
1.2 Problemática.....	14
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 General.....	15
1.3.2 Específicos .....	15
1.4 Hipótesis.....	15
1.5 Justificación.....	15
1.6 Alcance.....	16
1.7 Limitaciones.....	16
Capítulo II .....	17
2. Marco teórico.....	18
2.1 Mapeo de proceso .....	18
2.1.1 Diagrama de flujo de proceso .....	19
2.2 Diagrama SIPOC .....	19
2.3 Analisis del sistema de medición .....	20
2.3.1 Criterios de aceptación .....	20

2.3.2	Estudio R&R .....	21
2.3.3	Análisis de resultados.....	23
2.4	Capacidad de proceso.....	25
2.4.1	Índices de capacidad.....	25
2.5	Distribución normal.....	27
2.5.1	Propiedades de la curva normal .....	27
2.6	Regresión lineal múltiple.....	27
3.7	Diseño de experimentos .....	30
3.7.1	Etapas en el diseño de experimentos .....	30
3.7.2	Diseño factorial.....	31
Capítulo III	.....	33
3.	Metodología.....	34
Capítulo IV	.....	35
4.	Desarrollo del proyecto.....	36
4.1	Mapeo de proceso.....	36
4.2	Diagramas SIPOC .....	36
4.3	Definición de variables.....	39
4.4	Medición de variables .....	41
4.4.1	Análisis del sistema de medición .....	42
4.4.2	Capacidad del proceso .....	46
4.5	Análisis de datos .....	49
4.5.1	Prueba de normalidad .....	49
4.5.2	Análisis de regresión lineal .....	51
4.5.3	Optimización de respuesta .....	60
4.5.4	Diseño de experimentos .....	60
4.6	Medidas de mejora .....	66
4.7	Medidas de control .....	72
4.7.1	Capacidad de proceso.....	74
4.7.2	Curva de secado .....	75
4.7.3	Procedimientos estándar y ayudas visuales .....	77

Resultados.....	78
Conclusiones .....	79
Recomendaciones .....	80
Bibliografía.....	81
Anexos .....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores del Cp y su interpretación.....	26
Tabla 2.2 ANOVA para el diseño 3 <sup>2</sup> .....	32
Tabla 4.1 Medición de variables. ....	42
Tabla 4.2 Toma de muestras de almidón.....	43
Tabla 4.3 Prueba de Reproducibilidad y Repetibilidad.....	44
Tabla 4.4 Análisis de prueba R&R.....	45
Tabla 4.5 Resumen de datos para análisis.....	47
Tabla 4.6 Análisis de regresión lineal.....	54
Tabla 4.7 Análisis de regresión lineal con transformación Box-Cox.....	57
Tabla 4.8 Optimización de respuesta.....	60
Tabla 4.9 Niveles de factores.....	61
Tabla 4.10 Diseño factorial.....	62
Tabla 4.11 Variables del proceso de secado durante la corrida experimental.....	63
Tabla 4.12 Muestreo de almidón durante la corrida experimental.....	64
Tabla 4.13 Corrida de experimentos.....	65
Tabla 4.14 Regresión factorial.....	67
Tabla 4.15 Optimización de respuesta del diseño de experimentos.....	69
Tabla 4.16 Consumo de energía.....	71
Tabla 4.17 Corridas de prueba.....	74

Tabla 4.18 Resultados de curva de secado. ....	76
--	----

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Resumen gráfico del sistema de medición.....	46
Gráfica 4.2 Informe de capacidad de proceso.....	48
Gráfica 4.3 Resumen gráfico % humedad inicial del almidón.....	50
Gráfica 4.4 Resumen gráfico % humedad final del almidón. ....	51
Gráfica 4.5 Resumen gráfico de respuesta. ....	52
Gráfica 4.6 Residuos para respuesta.....	55
Gráfica 4.7 Probabilidad normal de residuos. ....	55
Gráfica 4.8 Residuos para respuesta.....	59
Gráfica 4.9 Probabilidad normal de residuos. ....	59
Gráfica 4.10 Optimización de respuesta. ....	61
Gráfica 4.11 Resumen gráfico de residuos para respuesta.....	68
Gráfica 4.12 Probabilidad normal.....	68
Gráfica 4.13 Optimización de respuesta del diseño de experimentos. ....	69
Gráfica 4.14 Efectos principales para respuesta. ....	70
Gráfica 4.15 Contorno de superficie de respuesta. ....	70
Gráfica 4.16 Superficie de respuesta.....	71
Gráfica 4.17 Probabilidad normal de corridas. ....	73
Gráfica 4.18 Probabilidad normal de corridas para respuesta.....	73
Gráfica 4.19 Informe de capacidad de proceso.....	76
Gráfica 4.20 Curva de secado. ....	77

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 4.1 Proceso de secado del almidón de maíz. ....	37
--	----

Diagrama 4.2 SIPOC de caldera.....	38
Diagrama 4.3 SIPOC de tanque de almacenamiento de agua. ....	39
Diagrama 4.4 SIPOC de cuarto de secado. ....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Conformación de la empresa. ....	14
---	----

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 Definición de variables. ....	40
--	----

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registro de variables del proceso de secado.....	83
Anexo 2. Muestreo de almidón. ....	86
Anexo 3. Resumen de datos para análisis.....	89
Anexo 4. Variables del proceso de secado durante la corrida experimental.....	91
Anexo 5. Muestreo de almidón durante la corrida experimental. ....	94
Anexo 6. Corrida de experimentos.....	97
Anexo 7. Corridas de prueba. ....	100
Anexo 8. Procedimiento de manejo de almidón. ....	102
Anexo 9. Procedimiento de uso de la termo-balanza. ....	103
Anexo 10. Arreglo de tarimas en el cuarto de secado.....	104
Anexo 11. Toma de muestras de almidón.....	105
Anexo 12. Matriz de secado del almidón de maíz. ....	107

## **RESUMEN**

El presente proyecto se desarrolló en la empresa Industrias Vía Láctea S.A. de C.V., en la cual, se estudió el proceso de secado del almidón de maíz mediante la metodología del diseño de experimentos (DoE), y se eligió como técnica principal el diseño factorial  $3^2$  para proponer una combinación de temperatura y humedad en un cuarto de secado que permita obtener condiciones óptimas de humedad del almidón para la fabricación de los productos.

El diseño factorial implicó el análisis de tres niveles (alto, medio y bajo) para dos factores (temperatura y humedad del cuarto), los cuales impactan de manera significativa en la respuesta (diferencia de las humedades de entrada y de salida del almidón).

Después de ejecutar las corridas y analizar los resultados, se determinó que la mejor combinación corresponde a 65°C de temperatura y 15% de humedad. Obteniendo una respuesta promedio de 3.6912% de reducción de humedad del almidón durante 13 horas de funcionamiento. Al emplearse en el proceso de secado, se obtuvo un índice de capacidad potencial del proceso de 1.12, indicando que el proceso es capaz de cumplir con especificaciones en cuanto a la humedad final del almidón.

Finalmente, se obtuvo la curva de secado del almidón de maíz con el propósito de pronosticar el tiempo necesario de funcionamiento del cuarto de secado partiendo de una humedad inicial del almidón, para obtener un porcentaje de humedad final de éste que cumpla con los requerimientos del producto a fabricar.

## **INTRODUCCIÓN**

El almidón de maíz es considerado como una materia prima funcional dentro de las actividades de Industrias Vía Láctea S.A. de C.V., debido a que es utilizado como agente de moldeo. El uso de almidón para moldear es un método para formar impresiones de diferentes figuras en cajones con almidón, en los cuales se deposita la fórmula. La función de este método es lograr una forma bien definida del producto promoviendo su fijación y absorber la humedad del mismo. El almidón suele ser adicionado con aceite mineral ya que tiene alta estabilidad. Se debe suministrar en una cantidad adecuada para evitar que las impresiones de las figuras se fisuren o se deshagan.

Generalmente, el producto semiterminado es desmoldado en charolas de acero inoxidable, separando los productos de los cajones con almidón por la acción del vaciado. Los cajones vacíos se rellenan nuevamente con almidón, se alisan al ras y se imprimen con una figura. Posteriormente pasan a un cuarto de secado para reducir su humedad a un porcentaje adecuado para el producto que será fabricado y depositado mediante un sistema de inyección por pistones, en los cajones previamente impresos con la figura deseada.

Los rangos de humedad del almidón varían para cada tipo de producto, sin embargo, es recomendable para que la migración de humedad (del producto al almidón) se pueda controlar, los productos base azúcar requieran una humedad del almidón que vaya desde 5.1% a 6.0%, mientras que los productos cero azúcar requieran una humedad de 4.5% a 5.0%.

El presente estudio es desarrollado en la empresa antes mencionada, con la finalidad de controlar el proceso de secado del almidón de maíz, de tal manera que se obtenga una humedad de salida del almidón que cumpla con los requerimientos del producto a fabricar.

La estructura del trabajo se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta el marco de referencia, la problemática a atender, los objetivos a alcanzar, la hipótesis a demostrar, la justificación por la que se realiza, los alcances y las limitaciones del proyecto.

El segundo capítulo está conformado por el marco teórico basado en la metodología del diseño de experimentos. Está compuesto de los siguientes temas: mapeo de proceso, diagramas SIPOC, análisis del sistema de medición, capacidad del proceso, distribución normal, regresión lineal múltiple y diseño de experimentos.

En el tercer capítulo se presenta la metodología a utilizar, en la cual se mencionan los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo.

En el cuarto capítulo se desarrollan los pasos mostrados en la metodología para el logro de los objetivos.

Finalmente, se exponen los resultados obtenidos, las conclusiones a las que se llegaron, las recomendaciones para la empresa, la bibliografía utilizada y los anexos para soporte.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO DE REFERENCIA**

## 1. MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

Industrias Vía Láctea S.A. de C.V. es una empresa perteneciente a la industria alimentaria dedicada a la fabricación, venta y distribución de confitería (gomitas) y suplementos alimenticios, incorporando materias primas diseñadas tecnológicamente para ofrecer como resultado alimentos funcionales.

Los productos de confitería son elaborados principalmente a base de azúcar, glucosa, gretina, colorantes y saborizantes artificiales o naturales. Los confites pueden estar adicionados con vitaminas y nutrimentos de tipo orgánico. Entre sus principales productos se encuentran gomitas de agave, beta-glucano, complejo B12, glucosamina, colágeno, probiótico, omega 3, biotina, propóleo con miel, echinacea con miel, estrella, corazón, tulipán, cubo y ositos. Están enriquecidos con vitaminas y minerales que el cuerpo humano requiere día a día para enfrentar el constante estrés cotidiano.

Los equipos cumplen con las necesidades de la industria alimenticia y nutracéutica, ya que se cuenta con sistemas diseñados para la seguridad e inocuidad de todos los productos. Los modernos equipos y sistemas, aseguran que los productos contienen los ingredientes necesarios para cumplir los requerimientos específicos de los clientes más exigentes.

#### 1.1.1 MISIÓN Y VISIÓN

Misión: fabricar productos de calidad, saludables y diferenciados para ofrecer a los consumidores las mejores opciones de golosinas y suplementos que el mercado ofrece.

Visión: que la empresa sea reconocida como la mejor opción para los consumidores que buscan opciones sanas en el consumo de dulces, golosinas y suplementos alimenticios.

#### 1.1.2 POLÍTICA DE CALIDAD

La política de calidad de la empresa está basada en 5 puntos clave:

1. El éxito de los productos está basado en su calidad y diferenciación.
2. La calidad es una ventaja competitiva.
3. La calidad es un esfuerzo de todos.
4. La calidad la hacen las personas.
5. Calidad es sinónimo de acción, orden y control.

### 1.1.3 OBJETIVO

En la empresa, se ha percibido un mercado creciente con necesidades de llevar una alimentación sana, consumiendo cada vez menos azúcar y considerando que los suplementos alimenticios deben ser parte de su dieta diaria.

Es por eso que como objetivo se ha fijado atender a todo el nuevo mercado que necesita una manera agradable de consumir dulces y suplementos alimenticios sanos y funcionales para cuidar de su salud.

### 1.1.4 VALORES

En la fábrica y a lo largo de toda la cadena de suministro se trabaja con:

- Honestidad: se respeta la verdad.
- Comunicación: no se da nada por obvio y no se guarda silencio cuando se tiene algo que decir.
- Tolerancia: no se descalifica a las personas que tienen puntos de vista diferentes. Se les acepta con respeto genuino.
- Respeto: no se agrede ni física ni verbalmente a nadie.
- Compañerismo: el mejor resultado es producto de que todos en el equipo hagan lo mejor para sí mismos y para el grupo.
- Disciplina: forma de actuar cumpliendo los procedimientos, políticas y normas establecidas.

### 1.1.5 SERVICIOS

Maquila: se ha esforzado a lo largo de los años por atender las necesidades particulares de los consumidores. Es por esto que se ofrece el servicio de maquila a clientes nacionales e internacionales, contando con la maquinaria más moderna y precisa disponible.

Todos los productos que se fabrican tienen su propia marca, pero se ofrece la adaptación de estos productos para venderlos con la marca del cliente. Para esto, se tienen varias posibilidades:

- Utilizar los productos de la gama con empaque bajo la marca del cliente.
- Modificar y adaptar los productos a las necesidades del cliente.
- Crear productos nuevos, en forma y sabor, que sean únicos.

Pedidos: Se ofrece aparte de los productos de línea la posibilidad de personalizar el producto según el evento que el cliente requiera cubrir. Se puede trabajar con empaques que el cliente proporcione o brindar el apoyo para crear su propio empaque. Se preparan canastas de dulces según las especificaciones que proporcionen o también se les sugieren presentaciones según el tipo de evento.

Distribución: se entrega a toda la República con los servicios de mensajería más confiables o con el transportista de su preferencia.

1.1.6 ORGANIGRAMA

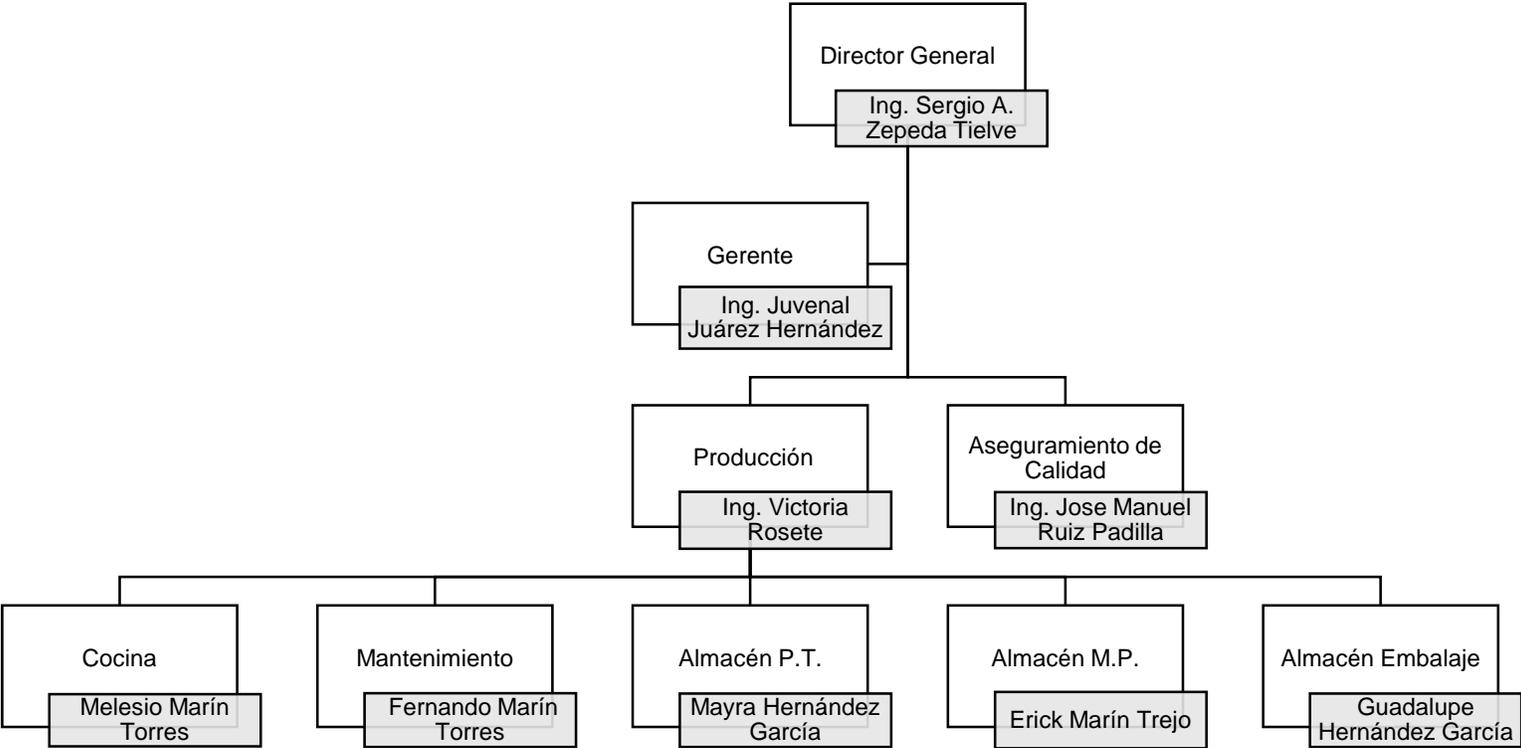


Figura 1.1 Conformación de la empresa.

Fuente: Industrias Vía Láctea S.A. de C.V.

1.2 PROBLEMÁTICA

Industrias Vía Láctea S.A. de C.V. cuenta con áreas de oportunidad. en el proceso de secado del almidón de maíz. Éste consiste en someter al almidón en un cuarto de secado para reducir su porcentaje de humedad, debido a que, si no se cumple con el porcentaje de humedad requerido, el almidón se adhiere al producto fabricado ocasionando desperdicios por reproceso.

La empresa no tiene bajo control el proceso de secado del almidón de maíz, existen desperdicios por reproceso y no hay un programa en el cuarto de secado ni un tiempo estandarizado que permita obtener el porcentaje de humedad óptimo para la fabricación de los productos.

### **1.3 OBJETIVOS**

A continuación, se enuncian las pretensiones del trabajo:

#### **1.3.1 GENERAL**

Maximizar el porcentaje de la diferencia de humedades de entrada y salida del almidón de maíz en el cuarto de secado de Industrias Vía Láctea S.A. de C.V. para obtener una humedad de salida menor a 5.5%, durante el periodo enero – junio de 2019.

#### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Realizar un diagnóstico del proceso de secado del almidón de maíz.
- Determinar e implementar soluciones de mejora.
- Verificar los resultados obtenidos.
- Mantener las mejoras logradas.

### **1.4 HIPÓTESIS**

Mediante la aplicación de un diseño experimental, es posible que, se logre determinar las condiciones óptimas de temperatura y humedad en el cuarto de secado que permitan obtener una humedad de salida del almidón de maíz que cumpla con los requerimientos del producto a fabricar.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

El proceso de secado del almidón de maíz es una parte crucial dentro de la fabricación de los productos de Industrias Vía Láctea S.A. de C.V., debido a que influye directamente en la calidad de estos. Sin el porcentaje de humedad requerido, el almidón se adhiere al producto fabricado, ocasionando que se tenga que reprocesar y por consecuencia pierde características de calidad como el sabor, color y tamaño.

Es necesario tomar medidas para medir, mejorar y controlar el proceso de secado del almidón de maíz, que permitan obtener el porcentaje de humedad eficaz con el uso eficiente de los recursos, para el beneficio de la empresa.

## **1.6 ALCANCE**

El presente trabajo es aplicado durante el periodo enero – junio de 2019 para el proceso de secado del almidón de maíz en el cuarto de secado fabricado por Pinco SA con número de serie 1095, con especial atención para la fabricación de los productos base azúcar.

Se pretende diagnosticar el proceso, definir variables, validar métricas, analizar la situación actual, identificar variables significativas y realizar experimentación sobre ellas; establecer soluciones, corroborar las mejoras, analizar la situación mejorada y establecer medidas de control.

## **1.7 LIMITACIONES**

- Resistencia al cambio por parte del personal operativo.
- Panel de control dañado del cuarto de secado.
- Desconocimiento de los fenómenos físico-químicos.
- Ausencia de plan de mantenimiento en los equipos.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 MAPEO DE PROCESO

Un mapeo de proceso es una representación gráfica de un proceso, mostrando la secuencia de tareas utilizando símbolos estándar de diagramas de flujo. Mediante la creación de un mapa de proceso, se muestran las distintas alternativas que cumplirán el objetivo y la planeación efectiva es facilitada. Los pasos involucrados son los siguientes:

Seleccionar el proceso a ser mapeado.

1. Definir el proceso.
2. Mapear el proceso primario.
3. Mapear las rutas alternas.
4. Mapear los puntos de inspección.
5. Usar el mapa para mejorar el proceso.

Un mapa de proceso provee una imagen integrada del proceso natural. Para controlar mejor los procesos que conforman el negocio, se sugiere que se le den nombres que expresen su estado inicial y final. Estos nombres deben implicar todo el trabajo que se realiza entre su inicio y su final. (Pyzdek, 1976).

La idea del mapa del proceso es hacer un diagrama de flujo más apegado a la realidad, en donde se especifiquen las actividades que efectivamente se realizan en el proceso (actividades principales, inspecciones, esperas, transportes, reprocesos). Además, un proceso puede ir desde un nivel alto hasta uno micro. En el primer caso no se entra a detalles y de lo que se trata es de tener una visión macro del proceso, que muchas veces es útil para delimitarlo e iniciar el análisis del mismo. En cambio, en un nivel micro es posible analizar de manera minuciosa una parte del proceso, y quizá se especifiquen uno o varios de los siguientes detalles:

- Las principales variables de salida y entrada de cada etapa del proceso.
- Los pasos que agregan y los que no agregan valor en el proceso.
- Listar y clasificar las entradas clave en cada paso del proceso. La clasificación se puede hacer con los siguientes criterios: crítico, controlable y de ruido.
- Añadir las especificaciones de operaciones actuales, así como los objetivos de proceso para las entradas controlables y críticas. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

### 2.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

Es una representación gráfica de la secuencia de los pasos o actividades de un proceso. Por medio de este diagrama es posible ver en qué consiste el proceso y cómo se relacionan las diferentes actividades; asimismo, es de utilidad para analizar y mejorar el proceso. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

Un diagrama de flujo es una herramienta que muestra gráficamente las entradas, acciones, y las salidas de un sistema dado. Estos términos se definen a continuación:

- Entradas: los factores de producción: materiales, mano de obra, equipo y administración.
- Acciones: la manera en que las entradas son combinadas y manipuladas para agregar valor. Las acciones incluyen procedimientos, manejo, almacenamiento, transporte y procesamiento.
- Salidas: los productos o servicios creados al actuar sobre las entradas. Las salidas son entregadas a los clientes u otros usuarios; e incluyen también resultados no planeados e indeseables, como el desperdicio y el retrabajo. Los diagramas de flujo también deben contener estas salidas. (Pyzdek, 1976).

### 2.2 DIAGRAMA SIPOC

Este diagrama tiene el objetivo de analizar el proceso y su entorno. Para ello se identifican los proveedores (P), las entradas (E), el proceso mismo (P), las salidas (S) y los usuarios (U). El acrónimo en inglés de este diagrama es SIPOC (suppliers, inputs, process, outputs and customers). Los pasos para realizar un diagrama SIPOC son los siguientes:

1. Delimitar el proceso y hacer su diagrama de flujo general donde se especifiquen las cuatro o cinco etapas principales.
2. Identificar las salidas del proceso, las cuales son los resultados (bienes o servicios) que genera el proceso.
3. Especificar los usuarios/clientes, que son quienes reciben o se benefician con las salidas del proceso.
4. Establecer las entradas (materiales, información, etc.) que son necesarias para que el proceso funcione de manera adecuada.
5. Por último, identificar proveedores, es decir, quienes proporcionan las entradas. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

## **2.3 ANALISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN**

Un estudio analítico es aquel que incrementa el conocimiento del sistema de causas que afectan el proceso. Los estudios analíticos son unos de los más importantes que usan datos de mediciones porque se dirigen finalmente a un mejor entendimiento de los procesos. El beneficio de usar un procedimiento basado en datos es ampliamente determinado por la calidad de los datos de medición usados. Si la calidad de los datos es baja, es muy probable que el beneficio del procedimiento sea muy bajo. Igualmente, si la calidad de los datos es alta, es muy probable que también el beneficio sea alto. Para asegurar que el beneficio derivado de los datos de medición usados sea altamente suficiente para garantizar el costo de su obtención, se requiere enfocar atención en la calidad de los datos. La calidad de los datos de medición es definida por las propiedades estadísticas de las múltiples mediciones obtenidas del sistema de medición operando bajo condiciones estables. Por ejemplo, suponer que un sistema de medición, operando bajo condiciones estables, es usado para obtener varias mediciones de una cierta característica. Si las mediciones están todas “cerca” al valor master de la característica, entonces se dice que la calidad de los datos es “alta”. Igualmente, si algunas o todas de las mediciones están “lejos” del valor master, entonces se dice que la calidad de los datos es “baja”. Las propiedades estadísticas más comúnmente usadas para caracterizar la calidad de los datos son el sesgo y varianza del sistema de medición. (AIAG, 2002).

La precisión es la variación que presentan los resultados al medir varias veces una misma pieza o al mensurando con el mismo equipo (sus componentes principales son la repetibilidad y la reproducibilidad). (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

La repetibilidad es la variación en las mediciones obtenida con un instrumento de medición cuando se use varias veces por un evaluador y midiendo la misma característica y sobre la misma parte. La reproducibilidad es típicamente definida como la variación en el promedio de las mediciones hechas por diferentes evaluadores usando el mismo equipo de medición cuando se mide la misma característica y sobre la misma parte. (AIAG, 2002).

### **2.3.1 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN**

Los criterios para saber si la variabilidad de un sistema de medición es satisfactoria dependen del porcentaje de la variabilidad del proceso de manufactura / producción o de la tolerancia de la parte que es consumida por la variación del sistema de medición. Los criterios de aceptación final para sistemas de medición específicos dependen del medio

ambiente y propósito del sistema de medición y debieran ser acordados con el cliente. Para sistemas de medición cuyo propósito es analizar un proceso, una regla empírica y general para la aceptación de un sistema de medición es como sigue:

- Debajo de un error del 10% - generalmente considerado como un sistema de medición aceptable.
- Entre el 10 y el 30% de error – puede ser aceptable y en base a la importancia de la aplicación, costo del dispositivo de medición, costos de reparación, etc.
- Arriba del 30% - considerado como no aceptable – debieran hacerse esfuerzos por mejorar el sistema de medición. (AIAG, 2002).

### 2.3.2 ESTUDIO R&R

Las fuentes de variabilidad que se pueden evaluar en un estudio R&R son: variabilidad del producto, del instrumento y de los operadores. Para cada instrumento de medición que se desee evaluar es necesario plantear un estudio en el que se apliquen los siguientes pasos:

- Seleccionar dos o más operadores o personas que participen en el estudio haciendo mediciones.
- Seleccionar adecuadamente un conjunto de 10 o más partes o piezas que serán medidas varias veces por cada operador. Es importante que la selección se realice a partir de piezas que reflejen las diferentes dimensiones de piezas que se producen.
- Decidir el número de ensayos o veces que cada operador medirá la misma pieza. En un estudio largo se deben hacer por lo menos dos ensayos, y tres es lo más recomendable.
- Etiquetar cada parte y aleatorizar el orden en el cual las partes se dan a los operadores. Identificar la zona o punto en la parte donde la medición será tomada, así como el método o técnica que deberá aplicarse.
- El operador A realiza en orden aleatorio su primera medición a todas las piezas consideradas.
- Volver a aleatorizar las piezas y obtener la primera medición del operador B.
- Continuar hasta que todos los operadores hayan realizado la primera medición de todas las piezas.
- Repetir los tres pasos anteriores hasta completar el número de ensayos elegidos. Es preciso asegurarse de que los resultados previos de un ensayo no son conocidos por los operadores. Es decir, en cada medición realizada el operador no debe

conocer cuál pieza está midiendo, ni cuáles fueron sus mediciones anteriores sobre ella, menos las reportadas por los demás operadores.

- Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio acerca de la calidad del proceso de medición y decidir acciones futuras sobre el mismo.

Realizar las repeticiones o ensayos operador por operador como se describe en los pasos anteriores puede introducir efectos temporales en la reproducibilidad (variación debida a los operadores), por lo que otra manera adecuada de obtener los datos es medir en orden completamente aleatorio cada combinación (operador, pieza) para cada repetición. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

Con base en los criterios aceptación del sistema de medición, se toma una decisión acerca de lo que se debe hacer. En caso de que se decida mejorar el sistema de medición es importante ver cuál de los componentes de  $\sigma_{R\&R}$  es el que más contribuye al error de medición, ya que en primera instancia puede ser el instrumento, los operadores o ambos. De acuerdo con esto se tienen las siguientes posibilidades de acción:

- Si la fuente dominante de variación es la repetibilidad se deben investigar las posibles causas, algunas de las cuales pudieran ser: la suciedad del instrumento, componentes gastados, variabilidad dentro del mensurando, instrumento mal diseñado, funcionamiento inadecuado, método inadecuado, condiciones ambientales o que de plano el instrumento de medición utilizado no sea adecuado para realizar tal medición. En este caso se debe evaluar la posibilidad de sustituirlo.
- Cuando la reproducibilidad es la fuente principal de variabilidad, los esfuerzos se deben enfocar a estandarizar los procedimientos de medición y entrenar a los operadores para que se apeguen a ellos. Esto se debe a que, por lo general, se encontrará que los operadores usan métodos distintos, carecen de entrenamiento en el uso del equipo o se tiene un diseño inapropiado del instrumento que permite evaluaciones subjetivas.
- Si a pesar de la mala calidad de las mediciones la capacidad del proceso de producción es adecuada ( $C_p > 1.33$  y centrado en el valor nominal), entonces el desempeño inadecuado del sistema de medición no necesariamente es un problema crítico, pero en caso de mejorar la precisión se observaría un  $C_p$  todavía mejor. Por el contrario, si el proceso de producción es incapaz ( $C_p < 1$ ), los resultados inaceptables del estudio R&R pueden ser la diferencia entre reportar o no el proceso como capaz. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

### 2.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística y estándar y puede ser utilizada para analizar los errores en las mediciones y otras fuentes de variabilidad de los datos en un estudio de sistemas de medición. En el análisis de varianza, la varianza puede ser seccionada en cuatro categorías: partes, evaluadores, interacción entre las partes y evaluadores y error de replicación debida al gage. Las ventajas de las técnicas ANOVA, comparadas con los métodos de promedios y rangos, son que:

- Son capaces de manejar cualquier ajuste experimental.
- Pueden estimar las varianzas en forma más exacta.
- Extractan más información (tal como el efecto de la interacción de las partes y los evaluadores) de datos experimentales. (AIAG, 2002).

El método de ANOVA reparte la variación total ( $\sigma^2$  total) de los datos en la siguiente forma:  $\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{parte}} + \sigma^2_{\text{oper}} + \sigma^2_{\text{oper} \times \text{parte}} + \sigma^2_{\text{instr}}$ . De los datos del estudio R&R se pueden calcular las llamadas sumas de cuadrados (SC) correspondientes a cada componente de variación, mismas que cumplen la relación:  $SC_{\text{total}} = SC_{\text{parte}} + SC_{\text{oper}} + SC_{\text{oper} \times \text{parte}} + SC_{\text{error}}$ ; donde la suma de cuadrados del error ( $SC_{\text{error}}$ ) corresponde a la repetibilidad. Al dividir cada suma de cuadrados por sus grados de libertad se obtienen los cuadrados medios (CM), que son las cantidades relevantes de este análisis. Con los cuadrados medios se pueden construir pruebas estadísticas para verificar diferencias entre las partes, entre los operadores y la presencia de efecto de interacción operador  $\times$  parte. Con base en esto se obtiene la repetibilidad, la reproducibilidad y el error de medición, los cuales, para su interpretación, se expresan como porcentajes de la variación total y de la tolerancia. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

El uso de herramientas gráficas es muy importante. Las herramientas gráficas específicas usadas dependen del diseño empleado para recolectar los datos. En la gráfica de promedios, los promedios de las lecturas múltiples por cada evaluador y en cada parte son graficados por evaluador con el número de parte como un índice. Esto puede ayudar a determinar la consistencia entre evaluadores. El gran promedio y los límites de control determinados usando el promedio de los rangos también son graficados. La gráfica de promedios resultante ofrece una indicación de la “facilidad de uso” del sistema de medición. El área dentro de los límites de control representa la sensibilidad (“ruido”) de las mediciones. Dado que el grupo de partes usado en el estudio representa la variación del proceso, aproximadamente una mitad o más de los promedios debiera caer fuera de los límites de

control. Si los datos muestran este patrón, el sistema de medición debiera ser adecuado para detectar variaciones de parte a parte, y el sistema de medición mismo puede ofrecer información útil para analizar y controlar el proceso. Si menos de la mitad cae fuera de los límites de control entonces el sistema de medición carece de una resolución efectiva y adecuada o la muestra no representa la variación esperada del proceso. (AIAG, 2002).

La gráfica de control de rangos es usada para determinar si el proceso está en control. La razón es que no importa que tan grande sea el error de las mediciones, pero los límites de control permitirán tal error. Esto es porque las causas especiales necesitan ser identificadas y retiradas antes de que el estudio de las mediciones sea relevante. Los rangos de las lecturas múltiples por cada evaluador y en cada parte son graficadas en una gráfica estándar de rangos incluyendo los rangos promedios y los límites de control. Del análisis de datos graficados pueden darse varias interpretaciones. Si todos los rangos están en control, los evaluadores están haciendo el mismo trabajo. Si un evaluador está fuera de control, el método usado difiere de los otros. Si todos los evaluadores están fuera de los rangos de control, el sistema de medición es sensible a la técnica del evaluador y requiere mejoramientos para obtener datos útiles. (AIAG, 2002).

La gráfica de rangos puede ayudar a determinar:

- El control estadístico con respecto a la repetibilidad.
- La consistencia del proceso de medición entre los evaluadores para cada parte.

En la gráfica de corridas, las lecturas individuales son graficas por parte para todos los evaluadores para obtener detalles de:

- El efecto de las partes individuales sobre la consistencia de la variación.
- La indicación de lecturas irregulares (ej., lecturas anormales).

En el diagrama de dispersión, las lecturas individuales son graficadas por parte y por evaluador para obtener detalles de:

- Consistencia entre los evaluadores.
- Indicación de posibles anormalidades.
- Interacciones parte – evaluador.

En las gráficas de bigotes, los valores de datos altos y bajos y el promedio por parte – evaluador son graficados. Esto ofrece detalles de:

- Consistencia entre evaluadores.

- Indicación de irregularidades.
- Interacciones parte – evaluador. (AIAG, 2002).

El gráfico de barras permite representar la contribución y los índices para cada componente de variación en el estudio. El porcentaje de contribución es el cociente de cada componente de varianza con respecto a la varianza total ( $\sigma^2_{\text{comp}}/\sigma^2_{\text{total}}$ ), índice que provee una interpretación en la escala de las varianzas: si la contribución es menor que 10% el sistema de medición es aceptable, pero se requiere una contribución máxima de 1% para que sea excelente. (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

## 2.4 CAPACIDAD DE PROCESO

Los procesos tienen variables de salida, los cuales, por lo general, deben cumplir con ciertas especificaciones para que sea posible considerar que tal proceso funciona de manera satisfactoria. Analizar la capacidad o habilidad de un proceso consiste en conocer la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada; esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria. (Guitierrez, 2010).

### 2.4.1 ÍNDICES DE CAPACIDAD

Los índices de capacidad son mediciones especializadas en evaluar la capacidad, que permiten comparar procesos y detectar la necesidad de mejoras. El índice de capacidad potencial del proceso,  $C_p$  se define de la siguiente manera:  $C_p = (ES - EI) / 6\sigma$ ; donde  $\sigma$  representa la desviación estándar del proceso, y ES y EI son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad. El índice  $C_p$  compara el ancho de las especificaciones o variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real del proceso.

Para que el proceso pueda considerarse potencialmente capaz de cumplir con especificaciones, se requiere que la variación real (natural) siempre sea menor que la variación tolerada. De aquí que lo deseable es que el índice  $C_p$  sea mayor que 1, y si el valor del índice  $C_p$  es menor que uno, es una evidencia de que no cumple con especificaciones. Para una mayor precisión en la interpretación, la tabla 2.1 presenta cinco categorías de procesos que dependen del valor del índice  $C_p$ , suponiendo que el proceso está centrado. (Gutiérrez, 2010).

Tabla 2.1 Valores del Cp y su interpretación.

Valor del índice Cp	Clase o categoría proceso	Decisión (Si el proceso está centrado)
Cp >= 2	Clase mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
Cp > 1.33	1	Adecuado.
1 < Cp < 1.33	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
0.67 < Cp < 1	3	No adecuado para el trabajo. Un análisis del proceso es necesario. Requiere modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria.
Cp <= 0.67	4	No adecuado para el trabajo. Requiere modificaciones muy serias.

Fuente: (Gutiérrez, 2010).

Si al analizar el proceso se encuentra que su capacidad no es compatible con las tolerancias, existen tres opciones: mejorar el proceso, cambiar las tolerancias o sufrir e inspeccionar 100% de los productos. Por el contrario, si hay capacidad excesiva, ésta se puede aprovechar, por ejemplo, reasignando productos a máquinas menos precisas, acelerando el proceso y reduciendo la cantidad de inspección. (Gutiérrez, 2010).

El índice de capacidad real del proceso (Cpk) se puede ver como una versión corregida del Cp que sí toma en cuenta el centrado del proceso. Para calcularlo hay varias formas equivalentes, una de las más comunes es la siguiente:

$Cpk = \text{Mínimo} ( (\mu - EI) / 3\sigma , (ES - \mu) / 3\sigma )$ , el índice Cpk es igual al índice unilateral más pequeño, por lo que si el valor del Cpk es satisfactorio (mayor que 1.25), eso indicará que el proceso en realidad es capaz. Si  $Cpk < 1$ , entonces el proceso no cumple con por lo menos una de las especificaciones. Algunos elementos adicionales para la interpretación del índice Cpk son:

- El índice Cpk siempre será menor o igual que el índice Cp. Cuando sean muy próximos, eso indicará que la media del proceso está muy cerca del punto medio de las especificaciones, por lo que la capacidad potencial y real son similares.
- Si el valor del índice Cpk es mucho más pequeño que el Cp, esto indicará que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones. De esa manera, el índice Cpk estará indicando la capacidad real del proceso, y si se corrige el problema de descentrado, se alcanzará la capacidad potencial indicada por el índice Cp.
- Cuando el valor del Cpk sea mayor que 1.25 en un proceso ya existente, se considerará que se tiene un proceso con capacidad satisfactoria. Mientras que para procesos nuevos se pide un  $Cpk > 1.45$ .

- Es posible tener valores del Cpk iguales a cero o negativos, e indicarán que la media del proceso está fuera de las especificaciones. (Gutiérrez, 2010).

## 2.5 DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución de probabilidad continua más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal. Su gráfica, denominada curva normal, es la curva con forma de campana, la cual describe de manera aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Una variable aleatoria continua  $X$  que tiene la distribución en forma de campana se denomina variable aleatoria normal. La ecuación matemática para la distribución de probabilidad de la variable normal depende de los dos parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , su media y su desviación estándar, respectivamente. Por ello, se denotan los valores de la densidad de  $X$  por  $n(x; \mu, \sigma)$ . (Walpole, Myers & Myers, 2012).

### 2.5.1 PROPIEDADES DE LA CURVA NORMAL

- La moda, que es el punto sobre el eje horizontal donde la curva tiene su punto máximo, ocurre en  $x = \mu$ .
- La curva es simétrica alrededor de un eje vertical a través de la media  $\mu$ .
- La curva tiene sus puntos de inflexión en  $x = \mu \pm \sigma$ , es cóncava hacia abajo si  $\mu - \sigma < X < \mu + \sigma$ , y es cóncava hacia arriba en otro caso.
- La curva normal se aproxima al eje horizontal de manera asintótica, conforme se aleja de la media en cualquier dirección.
- El área total bajo la curva y sobre el eje horizontal es igual a uno. (Walpole et al, 2012).

## 2.6 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Muchos problemas de control de calidad requieren una estimación de la relación entre dos o más variables. A menudo, el interés se centra en encontrar una ecuación que relacione una variable particular con un conjunto de una o más variables. El análisis de regresión es una técnica estadística para estimar los parámetros de una ecuación relacionada una variable particular a un conjunto de variables. (Algunos autores se refieren a esto como mínimos cuadrados o ajuste de curva). La ecuación resultante se llama ecuación de regresión. (Juran & Godfrey, 1998).

La siguiente lista incluye varios usos de las ecuaciones de regresión:

- Pronósticos y predicciones
- Describir cuantitativamente la relación entre una variable particular y otro conjunto de variables.
- Interpolación entre valores de una función.
- Determinación de las variables independientes importantes.
- Localización de las condiciones óptimas de funcionamiento.
- Discriminación entre modelos alternativos.
- Estimando coeficientes de regresión particulares

Los pasos básicos en un estudio de regresión son los siguientes:

1. Obtener una declaración clara de los objetivos del estudio. Determinar qué variable será la variable de respuesta y qué variables se pueden incluir como variables independientes. Adicionalmente, obtener alguna medida de la precisión de los resultados requeridos, no necesariamente en terminología estadística. (Es importante tener una comprensión profunda de qué uso se hará de la ecuación de regresión, ya que esto puede impedir el uso de ciertas variables en la ecuación y también ayuda a comprender cuánto esfuerzo y dinero se debe dedicar al proyecto).
2. Especificar los procedimientos de recopilación de datos. Recoger los datos. (Los resultados finales solo pueden ser tan buenos como los datos en los que se basan. La planificación cuidadosa en esta etapa es de considerable importancia y también puede simplificar el análisis de los datos).
3. Preparar gráficos cruzados (gráficos de una variable versus otra) de los datos para obtener información sobre las relaciones entre las variables; filtrar los datos; calcular la ecuación de regresión; y evaluar qué tan bien se ajusta a los datos (incluyendo mirar transformaciones de variables para un mejor ajuste, o la eliminación de variables de una ecuación si no mejoran la predicción). Dar medidas de la precisión de la ecuación y cualquier procedimiento para usar la ecuación. También especificar procedimientos para actualizar la ecuación y verificaciones para determinar si aún es aplicable, incluyendo gráficos de control para los residuos. (Juran & Godfrey, 1998).

La principal ventaja de la regresión múltiple es que permite utilizar más información disponible para estimar la variable dependiente. En algunas ocasiones, la correlación entre dos variables puede resultar insuficiente para determinar una ecuación de estimación confiable; sin embargo, si se agregan los datos de más variables independientes, se puede

determinar una ecuación de estimación que describa la relación con mayor precisión. Además, en la regresión múltiple se puede observar cada una de las variables independientes y probar si contribuyen de manera significativa a la forma en que la regresión describe los datos. (Levin & Rubin, 2004).

El análisis de correlación es la herramienta estadística que se puede usar para describir el grado en el que una variable está linealmente relacionada con otra. Con frecuencia, el análisis de correlación se utiliza junto con el de regresión para medir qué tan bien la línea de regresión explica los cambios de la variable dependiente, Y. Sin embargo, la correlación también se puede usar sola para medir el grado de asociación entre dos variables. Los estadísticos han desarrollado dos medidas para describir la correlación entre dos variables: el coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación.

El coeficiente de determinación es la principal forma en que se puede medir el grado, o fuerza, de la asociación que existe entre dos variables, X y Y. Debido a que se usa una muestra de puntos para desarrollar rectas de regresión, se refiere a esta medida como el coeficiente de determinación muestral. El coeficiente de determinación muestral se deriva de la relación entre dos tipos de variación: la variación de los valores Y en un conjunto de datos alrededor de la recta de regresión ajustada y de su propia media. Los estadísticos también interpretan el coeficiente de determinación de la muestra viendo la cantidad de la variación en Y que se explica por la recta de regresión. El coeficiente de correlación es la segunda medida que se puede usar para describir qué tan bien explica una variable a otra. Cuando se trata con muestras, el coeficiente de correlación de la muestra se denota por  $r$  y es la raíz cuadrada del coeficiente de determinación de muestra. (Levin & Rubin, 2004).

El análisis de correlación (el estudio de la fuerza de las relaciones lineales entre variables) y el análisis de regresión (modelando la relación entre una o más variables independientes y una variable dependiente) son actividades de considerable importancia en Six Sigma. Un problema de regresión considera las distribuciones de frecuencia de una variable cuando otra se mantiene fija en cada uno de varios niveles. Un problema de correlación considera la variación conjunta de dos variables, ninguna de las cuales está restringida por el experimentador. Los análisis de correlación y regresión están diseñados para ayudar al analista a estudiar causa y efecto. Pueden emplearse en todas las etapas del proceso de resolución de problemas y planificación. Por supuesto, las estadísticas no pueden por sí mismas establecer causa y efecto. Probar causa y efecto requiere una sólida comprensión científica de la situación en cuestión. (Pyzdek, 1976).

### 3.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño estadístico de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras.

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor situaciones complejas de relación causa-efecto. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

#### 3.7.1 ETAPAS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

- **Planeación:** incluye actividades encaminadas a entender, delimitar el problema u objeto de estudio y seleccionar variables de respuesta y factores. Concluye con la especificación de los tratamientos a realizar y con la organización del trabajo experimental.
- **Análisis:** en esta etapa no se debe perder de vista que los resultados experimentales son observaciones muestrales, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel proceso). La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza ANOVA.
- **Interpretación:** con el respaldo del análisis estadístico formal, se debe analizar con detalle lo que ha pasado en el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar supuestos y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.
- **Control y conclusiones finales:** para concluir el estudio experimental se recomienda decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan. Además, es preciso organizar una presentación para difundir los logros. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

### 3.7.2 DISEÑO FACTORIAL

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes que en ocasiones tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor. Los factores pueden ser de tipo cualitativo cuantitativo. Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar. Así, la matriz de diseño o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

#### 3.7.2.1 Diseño factorial $3^k$

El diseño factorial  $3^k$  considera  $k$  factores con tres niveles cada uno y tiene  $3^k$  tratamientos. De manera específica, hay dos razones que hacen viable el diseño  $3^k$ :

- Se tienen factores de tipo continuo e interesa estudiar efectos cuadráticos como  $A^2$ ,  $B^2, \dots$ ,  $A^2 B$ ,  $B^2 A$ ,  $A^2 B^2, \dots$  (efectos de curvatura). Esto se hace cuando se cree que la variable de respuesta no es lineal, ni aproximadamente lineal en el rango de variación de los factores estudiados
- Los factores son categóricos o discretos y de manera natural tienen tres niveles cada uno.

El diseño factorial  $3^k$  es una de las alternativas experimentales que permite estudiar efectos de curvatura, además de efectos lineales y de interacción. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

#### 3.7.2.2 Diseño factorial $3^2$

Este diseño consiste en  $3^2 = 9$  tratamientos diferentes, que corresponden a todas las posibles maneras en que se pueden combinar dos factores en tres niveles cada uno. Sean  $A$  y  $B$  los factores, cada uno con tres niveles, a los cuales se les suele llamar bajo, medio y alto. El modelo estadístico para el diseño  $3^2$  se puede escribir considerando el efecto individual de cada factor y de la interacción entre ambos. En consecuencia, las hipótesis que se desean probar son:  $H_0$ : no hay efecto significativo del factor  $A$  sobre la variable de respuesta,  $H_0$ : no hay efecto del factor  $B$  sobre la variable de respuesta y  $H_0$ : no hay efecto de interacción de los factores  $A$  y  $B$  sobre la variable de respuesta. Estas hipótesis se

probarán con el ANOVA. El bosquejo del análisis de varianza para el diseño  $3^2$  se muestra en la tabla 2.2 (ver tabla 2.2).

Este diseño también requiere al menos de dos repeticiones para que haya grados de libertad para el error. Las sumas de cuadrados de los efectos A y B tienen 2 grados de libertad (número de niveles menos 1) y los grados de libertad para la interacción AB se obtienen con el producto  $2 \times 2 = 4$ . Si el valor-p para un efecto es menor que 0.05, entonces se rechaza la correspondiente hipótesis nula, y se concluye que tal fuente de variación afecta de manera significativa a la variable de respuesta. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Tabla 2.2 ANOVA para el diseño  $3^2$ .

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor-p</b>
<b>A</b>	SC <sub>A</sub>	2	CM <sub>A</sub>	CM <sub>A</sub> / CM <sub>E</sub>	P( F > F <sub>0</sub> )
<b>B</b>	SC <sub>B</sub>	2	CM <sub>B</sub>	CM <sub>B</sub> / CM <sub>E</sub>	P( F > F <sub>0</sub> )
<b>AB</b>	SC <sub>AB</sub>	4	CM <sub>AB</sub>	CM <sub>AB</sub> / CM <sub>E</sub>	P( F > F <sub>0</sub> )
<b>Error</b>	SC <sub>E</sub>	$3^2 (n-1)$	CM <sub>E</sub>		
<b>Total</b>	SC <sub>T</sub>	$n3^k - 1$			

Fuente: (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

En muchos casos el riesgo de tomar una decisión incorrecta con base en la tabla 2.2, aun sin desglosar a los componentes, es pequeño o nulo, ya que al graficar los efectos globales A, B y AB considerando los tres niveles de cada factor, se clarifica lo que ocurre con ellos y se toma en cuenta al momento de interpretarlos. Así mismo, la representación del efecto permite comprender cómo está actuando físicamente el factor sobre la variable de respuesta. Además, a partir de las gráficas es sencillo localizar el mejor tratamiento. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA**

### **3. METODOLOGÍA**

A continuación, se mencionan los pasos a seguir para el desarrollo del presente trabajo:

1. Realizar un mapeo del proceso de secado del almidón de maíz.
2. Realizar diagramas SIPOC del proceso.
3. Definir las variables que intervienen en el proceso.
4. Tomar y registrar mediciones de las variables definidas.
5. Validar métricas mediante el análisis del sistema de medición.
6. Determinar la situación actual mediante el análisis de la capacidad del proceso.
7. Realizar pruebas de normalidad de las mediciones obtenidas.
8. Hacer análisis de regresión lineal.
9. Identificar fuentes de variación y confirmar las variables significativas.
10. Realizar diseño de experimentos sobre las variables significativas.
11. Establecer e implementar soluciones de mejora.
12. Realizar corridas prueba para verificar los resultados.
13. Determinar la situación mejorada mediante el análisis de la capacidad del proceso.
14. Establecer medidas de control para mantener las mejoras.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

## **4. DESARROLLO DEL PROYECTO**

A continuación, se desarrollan los pasos a seguir del presente trabajo:

### **4.1 MAPEO DE PROCESO**

Se elabora un diagrama de flujo del proceso de secado de almidón de maíz con la finalidad de conocer la interacción de las actividades que intervienen en él, (ver diagrama 4.1). El proceso comienza por energizar la planta al accionar las pastillas en el tablero de control, posteriormente el área de mantenimiento se encarga de brindar los servicios que necesitarán las máquinas para trabajar. Las actividades a realizar son: purgar el tanque de condensado, abrir las llaves del tanque de condensado, abrir la llave de gas de la caldera, verificar si la llave de vapor de la caldera está cerrada para poder prenderla, accionar la bomba de agua y esperar a que llegue al nivel adecuado para accionar el quemador; purgar los drenes de la caldera y verificar que la presión esté en su nivel adecuado, abrir la llave de vapor de la caldera, purgar conducto de vapor, abrir la llave de vapor del tanque de agua y esperar a que alcance su temperatura adecuada. Finalmente, abrir la llave de paso hacia el cuarto de secado.

Por otra parte, el área de producción se encarga de preparar las máquinas para su funcionamiento. Las actividades a realizar son: suministrar almidón a la máquina mogul, ingresar cajones a la máquina mogul, colocar almidón en cajones e imprimir figura de gota de 6.6 g, retirar cajones y colocarlos en tarimas; ingresar cajones al cuarto de secado, elegir el programa preestablecido y encender el cuarto junto con la bomba de alimentación. Una vez alcanzada la humedad deseada, parar el cuarto y retirar cajones para su uso posterior.

### **4.2 DIAGRAMAS SIPOC**

Mediante la elaboración de los diagramas SIPOC, se recopilan datos pertinentes que intervienen en el proceso de secado del almidón de maíz. Permite comprender mejor todas las influencias que afectan el comportamiento de este. Se realizan los diagramas sobre las tres principales partes del proceso: caldera, tanque y cuarto de secado.

Para la caldera (ver diagrama 4.2), sus proveedores son los siguientes: la red de agua municipal, el tinaco de agua potable, el tanque de gas y la comisión federal de electricidad; los cuales se encargan de suministrar agua, gas y electricidad.

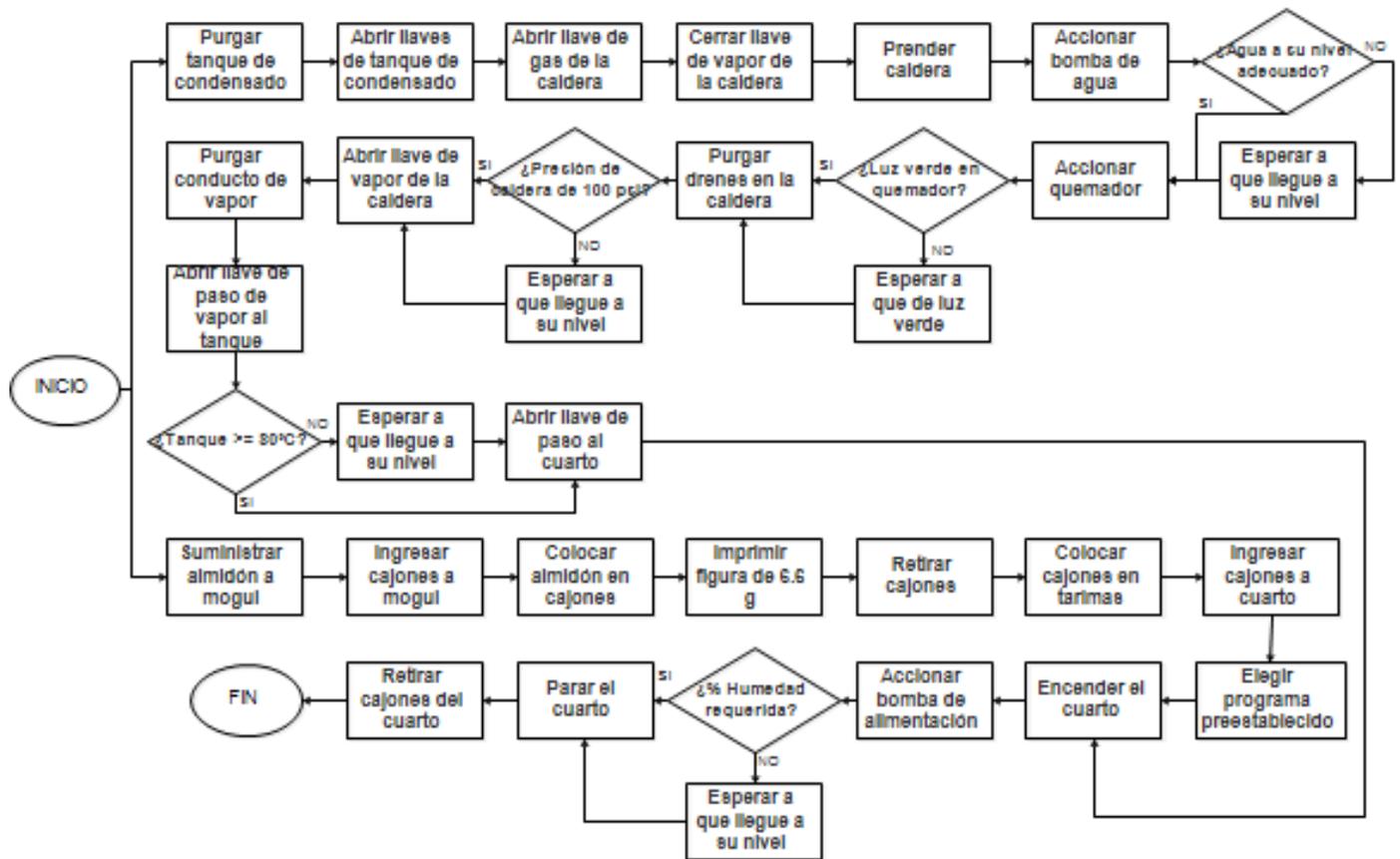


Diagrama 4.1 Proceso de secado del almidón de maíz.

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

El proceso consta de las siguientes actividades: purgar el tanque de condensado, abrir las llaves del tanque de condensado, abrir la llave de gas de la caldera, verificar si la llave de vapor de la caldera está cerrada para poder prenderla, accionar la bomba de agua y esperar a que llegue al nivel adecuado para accionar el quemador; purgar los drenes de la caldera y verificar que la presión esté en su nivel adecuado. Finalmente, abrir la llave de vapor de la caldera obteniendo como resultado la salida de vapor que va dirigida al tanque de agua.

Este proceso requiere de ciertas condiciones para que se realice óptimamente. Entre ellas están las siguientes: la presión debe estar en 100 psi, debe aparecer luz verde en el quemador y el agua debe estar dentro de su nivel marcado en el medidor.

Para el tanque de almacenamiento de agua (ver diagrama 4.3), su proveedor es la caldera. El proceso consta de las siguientes actividades: abrir la llave de paso de vapor hacia el tanque de agua, esperar a que alcance su temperatura adecuada y abrir la llave de paso de agua hacia el cuarto de secado.

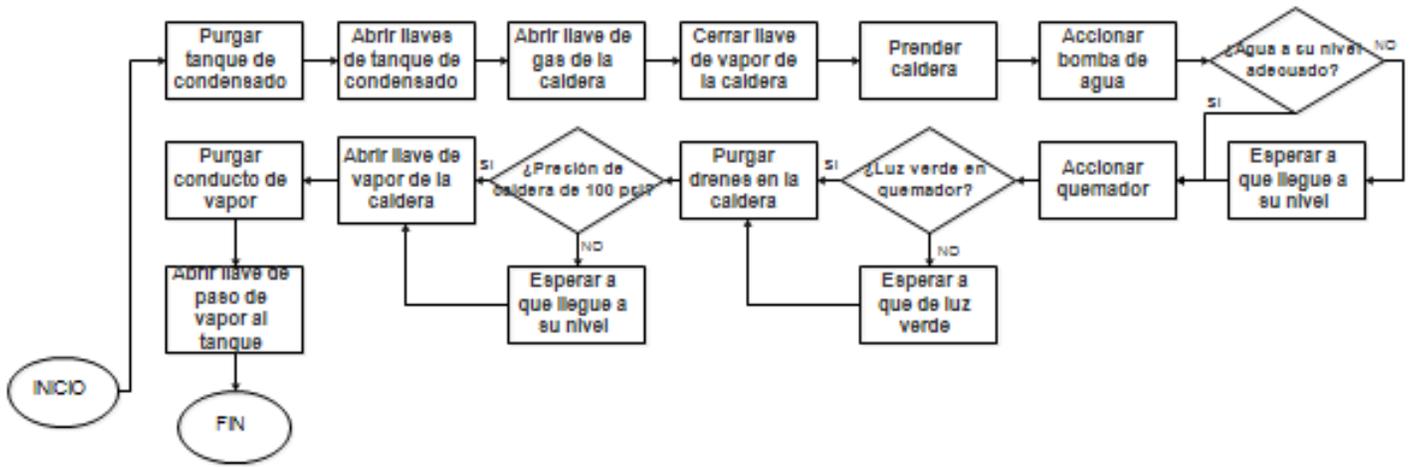
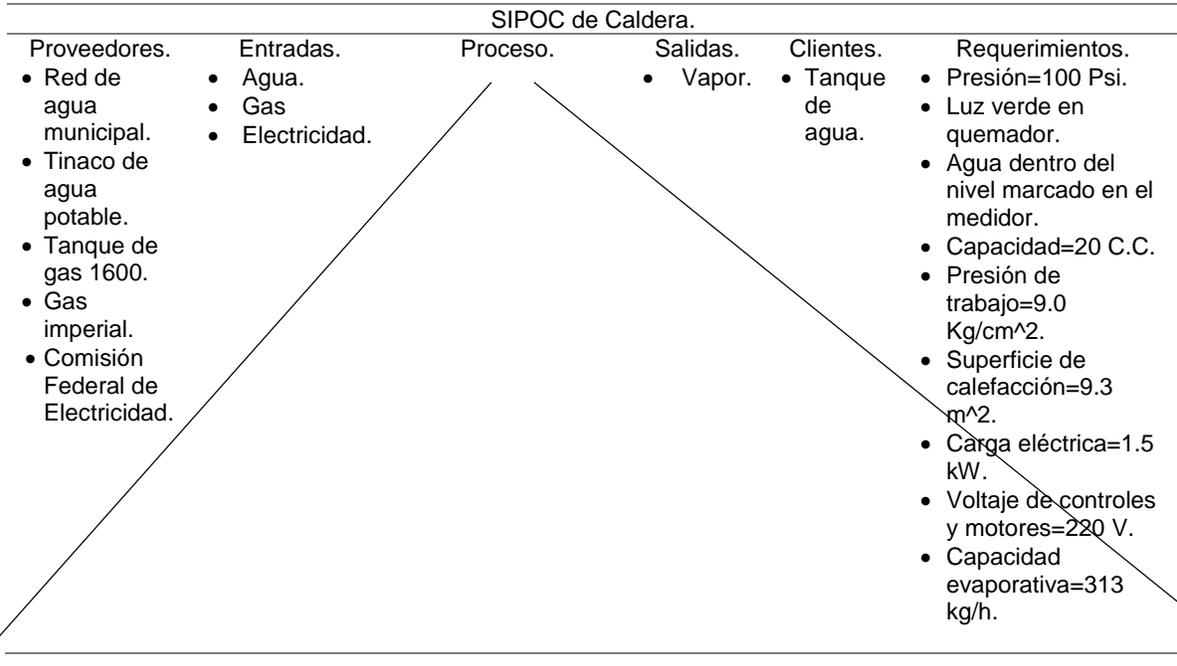


Diagrama 4.2 SIPOC de caldera.

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

De esta manera, se obtiene como resultado la salida de agua que va dirigida al cuarto de secado. Este proceso requiere que la temperatura sea mayor o igual a 80°C para que se realice óptimamente.

Para el cuarto de secado (ver diagrama 4.4), sus proveedores son el tanque de agua, la bomba de alimentación y la Comisión Federal de Electricidad.

El proceso consta de las siguientes actividades: suministrar almidón a la máquina mogul, ingresar cajones a la máquina mogul, colocar almidón en cajones e imprimir figura de gota de 6.6 g, retirar cajones y ponerlos en tarimas; ingresar cajones al cuarto de secado, elegir

el programa preestablecido y encender el cuarto junto con la bomba de alimentación. Una vez alcanzada la humedad deseada, parar el cuarto y retirar cajones para su uso posterior.

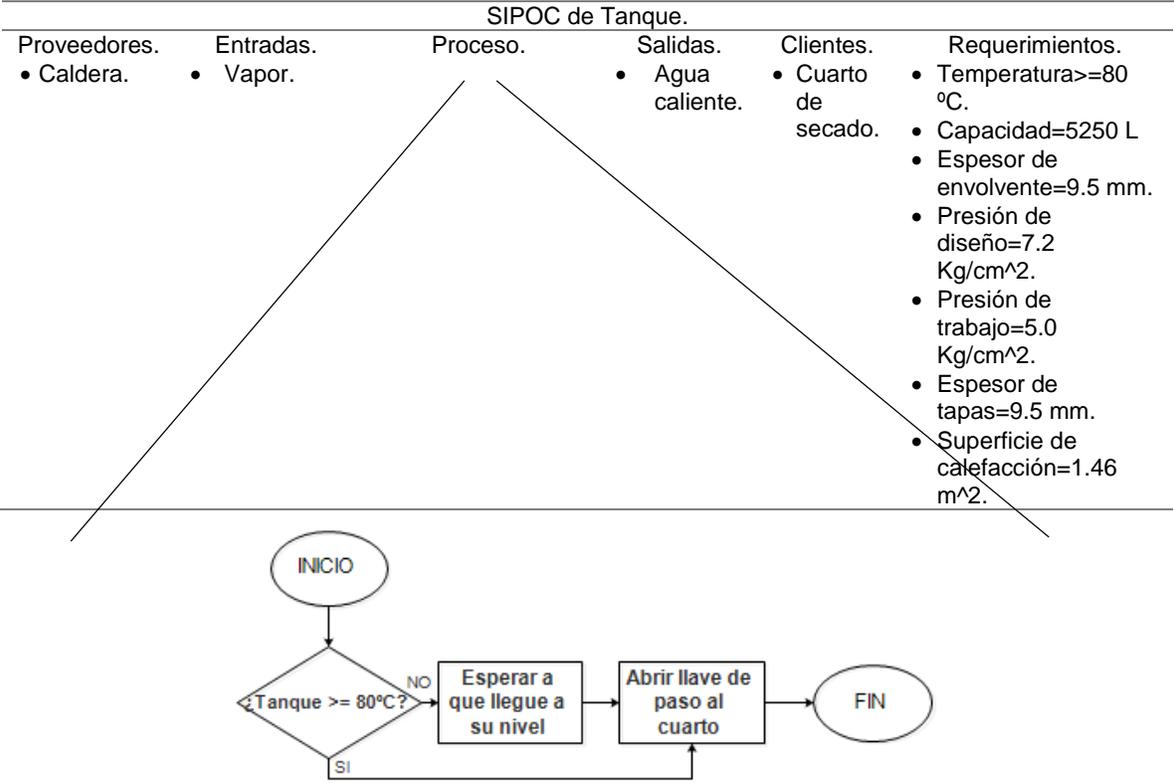


Diagrama 4.3 SIPOC de tanque de almacenamiento de agua.

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

De esta manera, se obtiene como resultado la salida de agua caliente del cuarto de secado y cajones con almidón seco. Este proceso requiere de ciertas condiciones para que se realice óptimamente. Entre ellas están las siguientes: la capacidad máxima es de 1240 cajones y la capacidad recomendada es de 1209 cajones, la temperatura máxima del cuarto debe ser menor o igual a 65 °C y la humedad mínima del cuarto debe ser mayor a 5%.

**4.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES**

Gracias a la elaboración del mapeo de proceso y los diagramas SIPOC, se pueden identificar las partes y las variables que intervienen en el proceso de secado del almidón de maíz. De esta manera se definen las variables a manejar en el estudio, (ver cuadro 4.1). Las variables independientes son: hora, temperatura del cuarto, humedad del cuarto, temperatura del tanque de agua, humedad del ambiente, temperatura del ambiente, presión de la caldera, porcentaje de humedad de entrada del almidón, porcentaje de humedad de

salida del almidón, arreglo de cajones en el cuarto, cantidad de cajones en el cuarto. Y la variable dependiente o de respuesta es la diferencia de las humedades de entrada y salida del almidón.

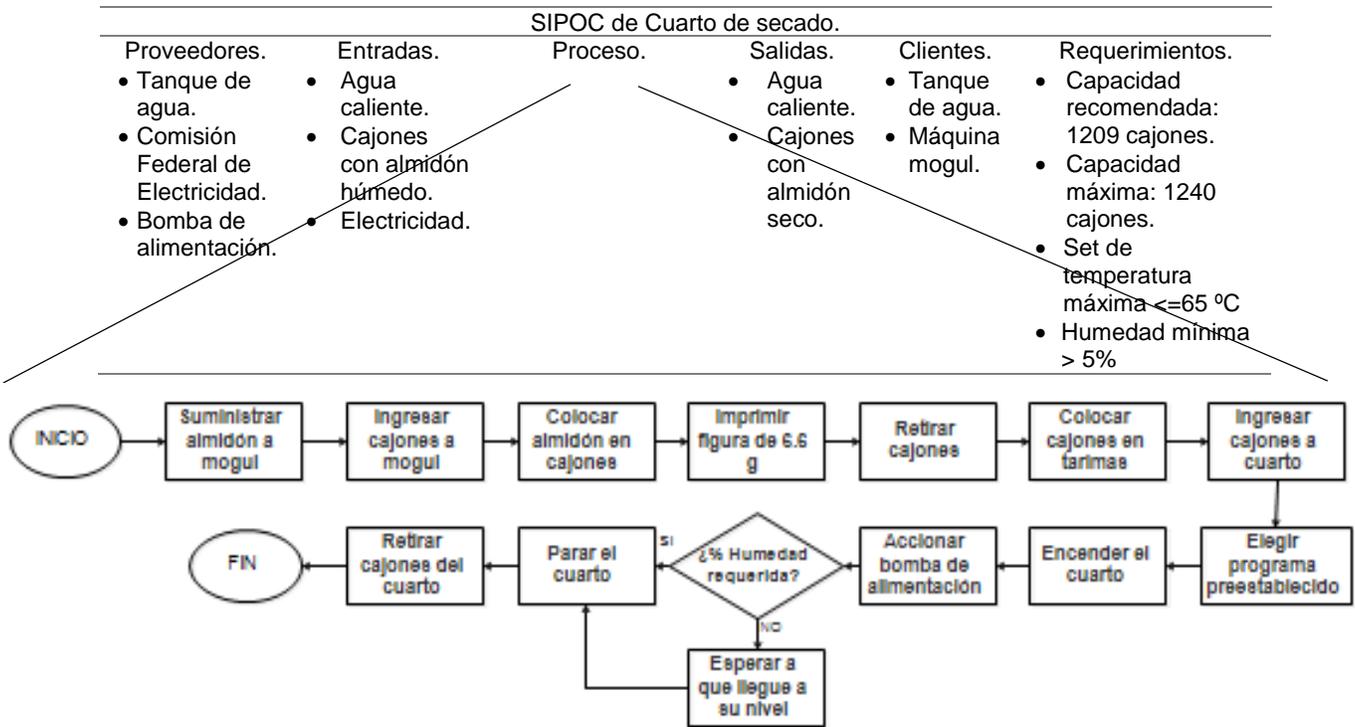


Diagrama 4.4 SIPOC de cuarto de secado.

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

Variables del estudio.	
Independientes.	Dependientes.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora.</li> <li>• Temperatura del cuarto.</li> <li>• Humedad del cuarto.</li> <li>• Temperatura del tanque de agua.</li> <li>• Humedad del ambiente.</li> <li>• Temperatura del ambiente.</li> <li>• Presión de la caldera.</li> <li>• Porcentaje de humedad de entrada del almidón.</li> <li>• Porcentaje de humedad de salida del almidón.</li> <li>• Arreglo de cajones en el cuarto.</li> <li>• Cantidad de cajones en el cuarto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferencia de las humedades de entrada y de salida del almidón.</li> </ul>

Cuadro 4.1 Definición de variables.

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

#### 4.4 MEDICIÓN DE VARIABLES

Una vez definidas las variables que intervienen en el proceso de secado, se procede a la obtención de datos de las mismas. Para el registro de variables del proceso de secado, se capturan datos cada hora durante el tiempo de funcionamiento del cuarto de secado y se registran en el formato REG-AC-008, los datos obtenidos se muestran en el anexo 1 (ver anexo 1) y parte de estos se muestran en la tabla 4.1 (ver tabla 4.1). El formato incluye los siguientes apartados: fecha, hora, temperatura cuarto (°C), % humedad cuarto, temperatura tanque (°C), % humedad ambiente, temperatura ambiente (°C) y presión caldera (psi).

La temperatura y humedad del cuarto se obtienen mediante la visualización de los valores en el panel de control. En este panel se monitorea el ventilador, el extractor, el enfriamiento y el calentamiento; y arroja valores de temperatura y humedad durante el tiempo de funcionamiento del cuarto, además, permite establecer programas que indican la temperatura máxima y humedad mínima requerida. La temperatura del tanque de agua se obtiene mediante la visualización del valor en el termómetro, el cual es un instrumento para medir la temperatura. La temperatura y humedad del ambiente se obtienen mediante la visualización de los valores en el termo-higrómetro, éste es un instrumento para medir la temperatura y humedad relativa. La presión de la caldera se obtiene mediante la visualización del valor en el manómetro, éste sirve para medir la presión de los fluidos en recipientes cerrados.

Así mismo se realiza un muestreo del almidón antes y después del funcionamiento del cuarto de secado, con la finalidad de conocer el porcentaje de humedad con el que entra y con el que sale. Las muestras se extraen por tarima, recolectando almidón en bolsas de celofán; la recolección se hace en el centro de uno de los cajones ubicados en la parte inferior de cada tarima, la razón de esto es porque el área de interés son los cajones que no reciben suficiente flujo de aire para poder secarse. El análisis del porcentaje de humedad se realiza por medio de una termo-balanza, la cual es un instrumento para medir la cantidad de agua contenida en las muestras.

Para el registro del muestreo del almidón, se capturan los datos una vez analizados y se registran en el formato REG-AC-009, los datos obtenidos se muestran en el anexo 2 (ver anexo 2) y parte de estos se muestran en la tabla 4.2 (ver tabla 4.2). El formato incluye los siguientes apartados: fecha, número de muestra, %humedad inicial, %humedad final, respuesta (%humedad inicial - %humedad final).

Tabla 4.1 Medición de variables.

Variables del proceso de secado.							
Fecha.	Hora.	Temperatura Cuarto (°C).	%Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque (°C).	%Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente (°C).	Presión Caldera. (psi)
18/02/2019	15	43.2	30.1	84	51	28.3	75
	16	47	30.2	84	51	27.7	100
	17	50.3	30.6	88	54	27.1	40
	18	53.5	31.3	90	57	26.4	90
	19	56	31.9	90	61	24.5	80
	20	56.1	32.1	80	61	23.3	100
	21	56.9	31.1	89	62	22.2	90
	22	57.4	30.6	90	65	21.9	80
20/02/2019	14	29.8	38.5	74	46	27.9	100
	15	35.8	33.9	73	47	28.5	98
	16	41	33.2	70	47	29.5	100
	17	45.9	33.5	80	48	28.2	100
	18	49.7	32.4	80	50	27.5	90
	19	53.2	32	85	50	27	90
	20	55	31.5	90	55	26.1	100
	21	56.1	31.2	90	56	25.5	100
22/02/2019	22	57.8	30.1	90	57	24.9	90
	16	29.9	30.9	60	59	23.7	90
	17	40.5	24.3	70	59	23.4	100
	18	43.3	24	75	59	23	100
	19	46.2	24.1	78	59	23	100
	20	49.5	23.5	80	59	22.3	100
	21	51.4	23.9	80	59	22.3	100
	22	51.4	24	80	59	22.3	100

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

#### 4.4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Se realiza el análisis del sistema de medición utilizando el método de estudio anidado para bloquear la variación que aportan los operadores debido a que no intervienen significativamente en la actividad. De esta manera, se pretende asegurar que calidad de los datos de medición sea alta y verificar que la termo-balanza se encuentre calibrada; garantizando la confiabilidad en las mediciones.

El análisis del sistema de medición se realiza sobre los datos registrados en la tabla 4.3 (ver tabla 4.3), la cual incluye los siguientes apartados: no. de parte, no. operador, y no. de réplica.

Tabla 4.2 Toma de muestras de almidón.

Muestreo de almidón.				
Fecha.	Muestra.	%Humedad inicial.	%Humedad final.	Respuesta (%Humedad inicial-%Humedad final).
18/02/2019	1	9.13	5.74	3.39
	2	10.93	6.28	4.65
	3	8.78	6.08	2.7
	4	9.21	5.72	3.49
	5	9.47	5.69	3.78
	6	9.21	6.94	2.27
	7	8.63	6.47	2.16
	8	11.1	6.24	4.86
	9	9.38	7.29	2.09
	10	9.28	6.98	2.3
20/02/2019	1	9.62	5.45	4.17
	2	9.43	5.48	3.95
	3	8.82	5.89	2.93
	4	9.25	5.42	3.83
	5	7.64	5.7	1.94
	6	9.49	5.74	3.75
	7	8.38	6.06	2.32
	8	9.09	6.43	2.66
	9	9.51	6.35	3.16
22/02/2019	1	7	5.66	1.34
	2	6.57	5.68	0.89
	3	7.21	5.4	1.81
	4	8.02	5.8	2.22
	5	7.05	5.34	1.71
	6	7.12	5.29	1.83
	7	7.31	6.58	0.73
	8	7.54	5.98	1.56
	9	7.42	5.89	1.53
	10	6.89	6.2	0.69

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

Se inicia el estudio considerando tres operadores, quince números de parte y tres réplicas de cada medición. Dentro del análisis se generan las siguientes pruebas de hipótesis:

En cuanto al operador. -

- H0: El operador no influye de manera significativa en la variación de las mediciones ( $P > 0.05$ ).

- H1: El operador sí influye de manera significativa en la variación de las mediciones ( $P < 0.05$ ).

Tabla 4.3 Prueba de Reproducibilidad y Repetibilidad.

Prueba R&R en termo-balanza.				
No. de Parte.	No. de Operador.	No. de Réplica.		
		1	2	3
1	1	11.42	11.38	11.2
2	1	11.64	11.69	11.66
3	1	11.27	11.28	11.3
4	1	11.82	11.68	11.74
5	1	11.29	11.25	11.48
6	2	11.86	11.77	11.82
7	2	11.4	11.16	11.27
8	2	12.08	12.1	12.04
9	2	11.31	11.24	11.25
10	2	11.43	11.4	11.55
11	3	11.17	11.29	11.19
12	3	12.04	11.93	11.81
13	3	11.44	11.37	11.49
14	3	11.21	11.12	11.05
15	3	11.14	11.19	11.21

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

En cuanto al instrumento de medición. -

- H0: El instrumento no influye de manera significativa en la variación de las mediciones ( $P > 0.05$ ).
- H1: El instrumento sí influye de manera significativa en la variación de las mediciones ( $P < 0.05$ ).

Para poder contrastar estas dos suposiciones se procede a generar el análisis de los datos mostrados en la tabla 4.4 (ver tabla 4.4) con apoyo del programa Minitab. De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), dado el valor P no significativo para el operador (0.607), se acepta la hipótesis nula y se concluye que éste no influye de manera significativa en las mediciones. Sin embargo, dado el valor P significativo para la parte operador (0.0), se concluye que las mediciones promedio de las diferentes partes anidadas en cada operador son significativamente diferentes.

De acuerdo con la evaluación del sistema de medición, se compara la variación del sistema con la variación total. El Gage R&R total del sistema de medición equivale al 24.56% de la variación del estudio, mientras que la variación entre las partes equivale al 96.94%, es decir, la mayor parte de la variabilidad puede ser explicada por las diferencias en las partes (muestras). Por lo tanto, la variación del R&R total del sistema de medición se considera aceptable y se concluye que el instrumento está calibrado.

De acuerdo con los componentes de la varianza, la conclusión es reforzada dado que el porcentaje de contribución del Gage R&R total es significativo (6.03 %), menor al 9%.

Tabla 4.4 Análisis de prueba R&R.

Estudio R&R del sistema de medición - método ANOVA anidado.					
ANOVA sistema de medición (anidado) para Réplicas.					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Operador	2	0.29637	0.148187	0.5203	0.607
Partes (Operador)	12	3.41791	0.284826	47.7361	0.000
Repetibilidad	30	0.17900	0.005967		
Total	44	3.89328			
Componentes de la varianza.					
Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)			
Gage R&R total	0.0059667	6.03			
Repetibilidad	0.0059667	6.03			
Reproducibilidad	0.0000000	0.00			
Parte a parte	0.0929530	93.97			
Variación total	0.0989196	100.00			
Evaluación del sistema de medición.					
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 x DE)	%Var. estudio (%VE)		
Gage R&R total	0.077244	0.46347	24.56		
Repetibilidad	0.077244	0.46347	24.56		
Reproducibilidad	0.000000	0.00000	0.00		
Parte a parte	0.304882	1.82929	96.94		
Variación total	0.314515	1.88709	100.00		

Fuente: Minitab 2018.

Así mismo se presenta el resumen derivado del análisis de datos en la gráfica 4.1 (ver gráfica 4.1). En la gráfica “componentes de la variación” se aprecia que la mayor parte de la variabilidad es explicada por la variación entre las partes.

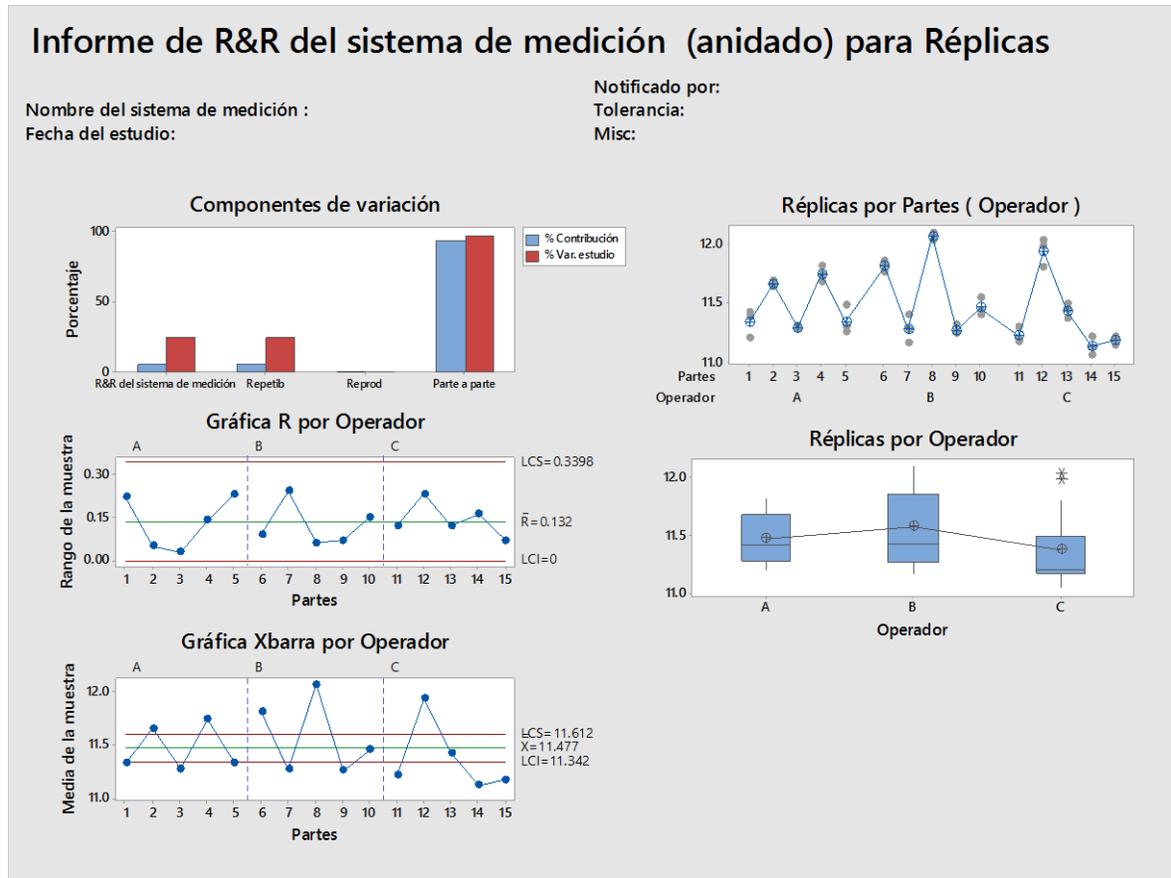
En la gráfica “R por operador” se deduce que la carta de control pasa las ocho pruebas, con esto se concluye que no existe la presencia de causas especiales en el proceso de medición. Además de que no hay un cambio significativo en la variabilidad del mismo.

En la gráfica “X barra por operador” se aprecia que la carta de control no pasa la primera de las ocho pruebas dado que hay varios puntos por encima y por debajo de los límites naturales de control. Existe la presencia de causas especiales en el proceso de medición y gran parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes.

La gráfica “Réplicas por partes (operador)” muestra que las diferencias entre las partes son grandes. No existe la presencia de datos atípicos que puedan influir sobre las conclusiones,

además, existe mucha variación entre las mediciones entre las partes (muestras) por lo que la variación parte a parte es significativa.

En la gráfica “Réplicas por operador”, las mediciones para cada operador varían en aproximadamente la misma cantidad. Además, los promedios de las partes varían por una pequeña cantidad. Aunque siempre existe alguna variación, los datos indican que los operadores miden las partes de manera similar.



Gráfica 4.1 Resumen gráfico del sistema de medición.

Fuente: Minitab 2018.

#### 4.4.2 CAPACIDAD DEL PROCESO

Se realiza el análisis de la capacidad de proceso con la finalidad de conocer el desempeño actual de éste, a través de la determinación de la amplitud de la variación natural para la característica de humedad final del almidón. Y así saber en qué medida la característica es satisfactoria (cumple especificaciones).

Se elabora un resumen de datos para análisis y se registran en el formato REG-AC-010, el cual incluye los siguientes apartados: temperatura cuarto, humedad cuarto, humedad inicial

de almidón, humedad final de almidón y respuesta (humedad inicial-humedad final). Los datos capturados se muestran en el anexo 3 (ver anexo 3) y parte de estos en la tabla 4.5 (ver tabla 4.5). El análisis se lleva a cabo utilizando la columna de humedad final de almidón y se presenta el informe en la gráfica 4.2 (ver gráfica 4.2), en el cual se considera un tamaño de subgrupo de 6 para un número de muestra de 54 datos.

*Tabla 4.5 Resumen de datos para análisis.*

Resumen de datos.				
Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
43.2	30.1	9.13	5.74	3.39
47	30.2	10.93	6.28	4.65
50.3	30.6	8.78	6.08	2.7
53.5	31.3	9.21	5.72	3.49
56	31.9	9.47	5.69	3.78
56.1	32.1	9.21	6.94	2.27
56.9	31.1	8.63	6.47	2.16
57.4	30.6	11.1	6.24	4.86
29.8	38.5	9.62	5.45	4.17
35.8	33.9	9.43	5.48	3.95
41	33.2	8.82	5.89	2.93
45.9	33.5	9.25	5.42	3.83
49.7	32.4	7.64	5.7	1.94
53.2	32	9.49	5.74	3.75
55	31.5	8.38	6.06	2.32
56.1	31.2	9.09	6.43	2.66
57.8	30.1	9.51	6.35	3.16
29.9	30.9	7	5.66	1.34
40.5	24.3	6.57	5.68	0.89
43.3	24	7.21	5.4	1.81
46.2	24.1	8.02	5.8	2.22
49.5	23.5	7.05	5.34	1.71
51.4	23.9	7.12	5.29	1.83
51.4	24	7.31	6.58	0.73
24.8	43	9.19	6.13	3.06
39.9	33.2	8.63	5.48	3.15
45.4	33	8.56	5.6	2.96
46.9	32.7	8.79	5.68	3.11

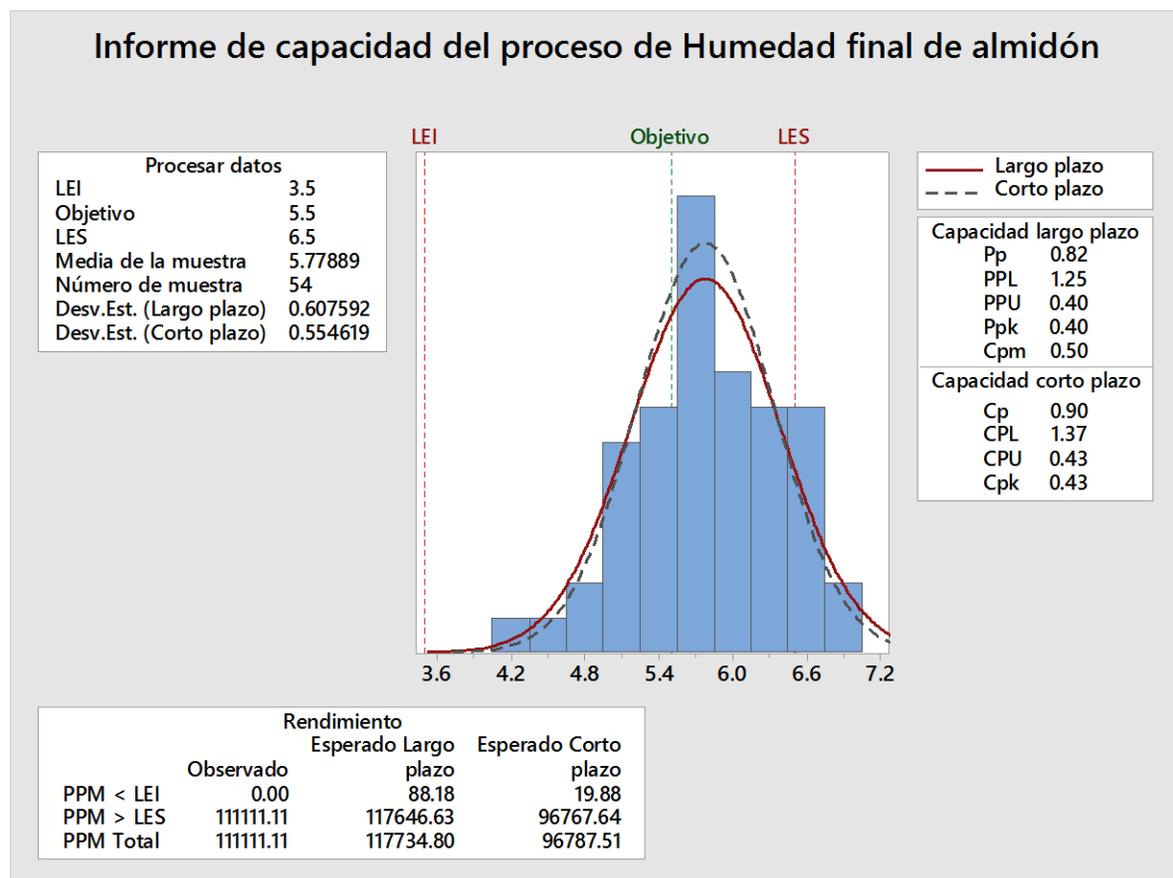
*Fuente: elaboración propia con información de la empresa.*

Los límites de especificación inferior y superior son dados a partir de los requerimientos del proceso en cuanto a la humedad final del almidón de maíz (3.5 % y 6.5 % respectivamente),

y el objetivo es dado por la condición óptima del almidón (5.5 % de humedad). De acuerdo con el indicador de la capacidad potencial del proceso ( $C_p$ ) de 0.90, se concluye que el proceso no es capaz de cumplir con especificaciones ya que es menor a 1. Por lo tanto, requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria debido a que, en el corto plazo se estiman 96787 muestras de humedad por cada millón que están fuera de especificaciones.

De acuerdo con el indicador de la capacidad real del proceso ( $C_{pk}$ ) de 0.43, se concluye que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones dado que es menor a 1.25. Por lo tanto, el proceso se encuentra descentrado.

De esta manera, se concluye que el proceso no es capaz ni es estable en cuanto a la media de la humedad final del almidón, por lo que es necesario establecer medidas de control para centrarlo y lograr que cumpla con las especificaciones.



Gráfica 4.2 Informe de capacidad de proceso.

Fuente: Minitab 2018.

## 4.5 ANÁLISIS DE DATOS

Se procede a la realización del análisis de datos con apoyo del programa Minitab. Los datos se encuentran en el formato REG-AC-010 del anexo 3 (ver anexo 3) y parte de estos en la tabla 4.5 (ver tabla 4.5) mostrada anteriormente.

Las variables independientes que se consideran aptas para su análisis son la temperatura y la humedad del cuarto; dado que son variables con las que se tiene control y por lo tanto son susceptibles de manipular para el diseño de experimentos.

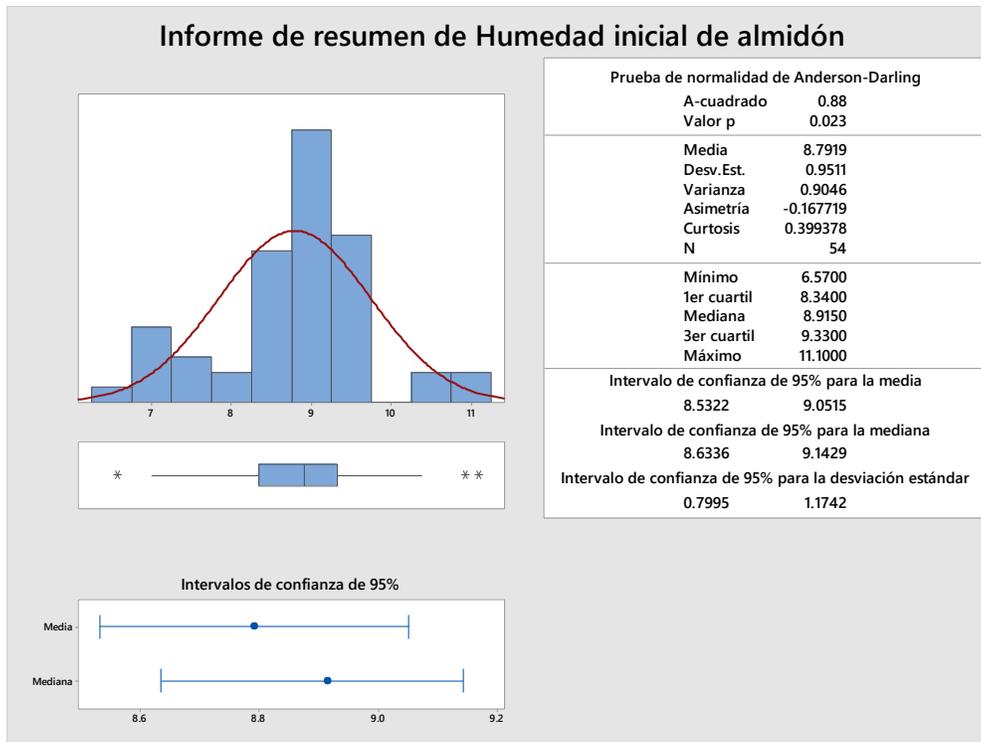
### 4.5.1 PRUEBA DE NORMALIDAD

Se analizan los datos de las siguientes columnas: humedad inicial de almidón, humedad final de almidón y respuesta (humedad inicial de almidón - humedad final de almidón) y se realiza un resumen gráfico de cada apartado para obtener los resultados de una prueba de normalidad de los datos mediante el estadístico Anderson-Darling.

El informe del resumen para la humedad inicial del almidón muestra un estadístico  $A^2$  de 0.88 y un valor P de 0.023 (ver gráfica 4.3). Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$   
H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).  
H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ )
- Para el valor P  
H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P  $> 0.05$ ).  
H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P  $< 0.05$ ).

Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P no significativos, se concluye que el porcentaje de humedad inicial del almidón no se ajusta a una distribución normal, debido a que existen causas especiales de variación. Esto es porque el almidón atrae humedad de diferentes fuentes de variación, entre ellas están el producto almacenado en él, el cual contiene diferente humedad debido a la formulación y diferente tiempo de permanencia en el almidón para poder enfriarse, ocasionando también diferentes tiempos de exposición al ambiente. Sin embargo, esta variación es inherente al proceso debido a la naturaleza de éste. Por lo tanto, se acepta la variación del porcentaje de humedad inicial del almidón.



*Gráfica 4.3 Resumen gráfico % humedad inicial del almidón*

*Fuente: Minitab 2018.*

El informe del resumen para la humedad final del almidón muestra un estadístico  $A^2$  de 0.23 y un valor P de 0.790 (ver gráfica 4.4). Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$ 

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).

H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ )
- Para el valor P

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P  $> 0.05$ ).

H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P  $< 0.05$ ).

Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que el porcentaje de humedad final del almidón se ajusta a una distribución normal.

El informe del resumen de respuesta (humedad inicial - humedad final de almidón) muestra un estadístico  $A^2$  de 0.27 y un valor P de 0.651 (ver gráfica 4.5). Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$ 

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).

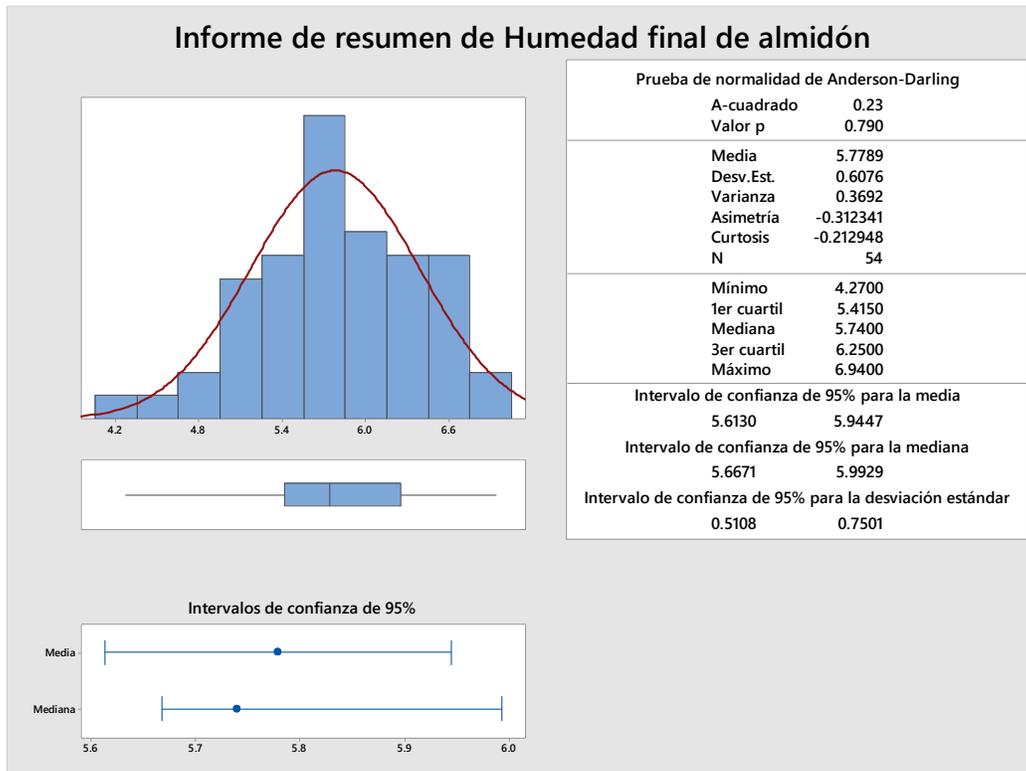
H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ )

- Para el valor P

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P > 0.05).

H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P < 0.05).

Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que la respuesta (humedad inicial - humedad final de almidón) se ajusta a una distribución normal.



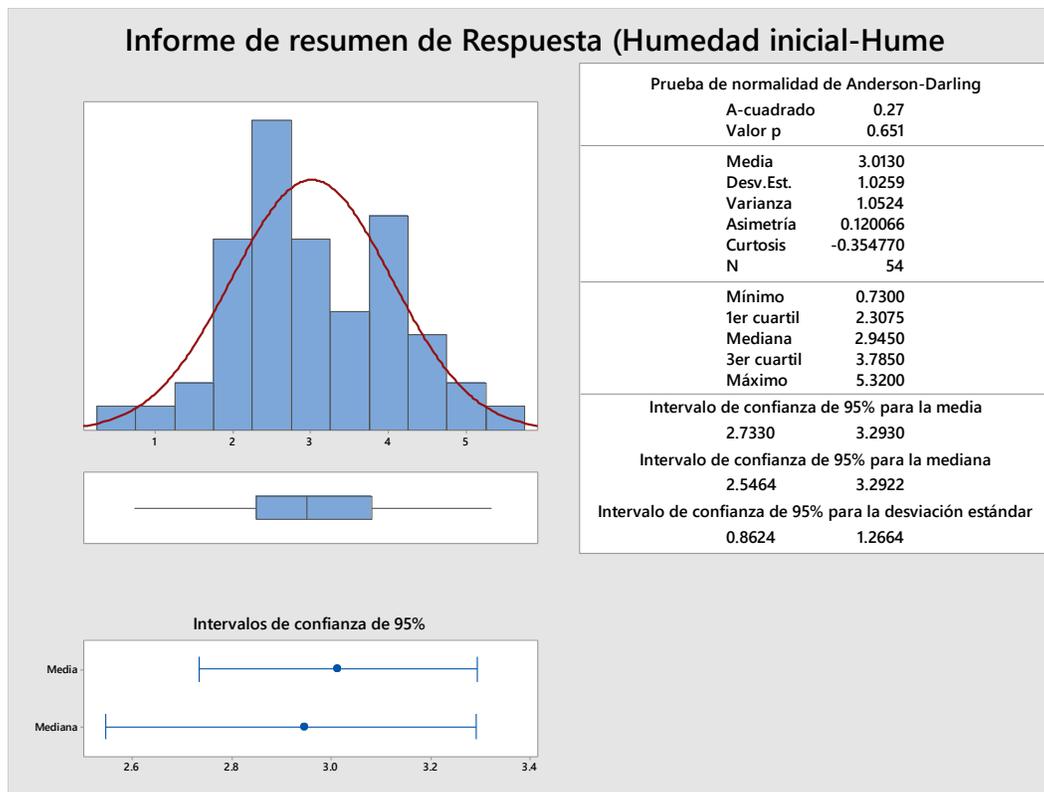
Gráfica 4.4 Resumen gráfico % humedad final del almidón.

Fuente: Minitab 2018.

#### 4.5.2 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL

Se realiza el análisis de regresión lineal múltiple incluyendo las siguientes variables independientes: temperatura del cuarto y humedad del cuarto; y la variable dependiente: respuesta (humedad inicial – humedad final).

Se efectúa un primer análisis considerando todas las interacciones posibles entre las variables independientes. Después de realizar los ajustes necesarios en el modelo se obtiene el resumen de regresión en la tabla 4.6 (ver tabla 4.6), del cual se concluye lo siguiente:



Gráfica 4.5 Resumen gráfico de respuesta.

Fuente: Minitab 2018.

En el análisis de varianza (ANOVA) se genera una prueba de hipótesis:

- H0: Las variables independientes no tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P > 0.05$ ).
- H1: Las variables independientes tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P < 0.05$ ).

Los resultados indican que tanto las variables independientes (temperatura del cuarto y humedad del cuarto) como sus interacciones dobles y una interacción triple de temperatura, son significativas ( $<0.05$ ). Es decir que las variables independientes influyen sobre la variable dependiente o de respuesta. En otras palabras, tanto la temperatura del cuarto como la humedad del cuarto influyen sobre la reducción del porcentaje de humedad del almidón.

El resumen del modelo indica mediante los coeficientes de correlación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado (34.28% y 25.89% respectivamente) que la calidad de ajuste del modelo no es muy buena, debido a que estos coeficientes se encuentran bajos. Sin embargo, se acepta el modelo de regresión como base para el diseño de experimentos.

La ecuación de regresión permite realizar predicciones sobre la respuesta de acuerdo a diferentes valores de las variables independientes. Mediante esta se puede saber el porcentaje de reducción de la humedad dados ciertos valores de temperatura y humedad del cuarto.

Así mismo se encuentran tres observaciones poco comunes en donde se detectaron datos atípicos en la respuesta (humedad inicial - humedad final), debido a causas especiales de variación en el proceso.

Se realiza un resumen gráfico para observar el comportamiento de los residuos generados durante el análisis de regresión (ver gráfica 4.6). La gráfica de cuatro en uno muestra la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de residuos vs. ajustes, el histograma y la gráfica de residuos vs. orden.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuos se ajustan a una distribución normal, sin embargo, se realiza la prueba de normalidad mediante el estadístico Anderson-Darling (ver gráfica 4.7) en la que se muestra un estadístico  $A^2$  de 0.673 y un valor P de 0.075. Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).

H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ )

- Para el valor P

H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P  $> 0.05$ ).

H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P  $< 0.05$ ).

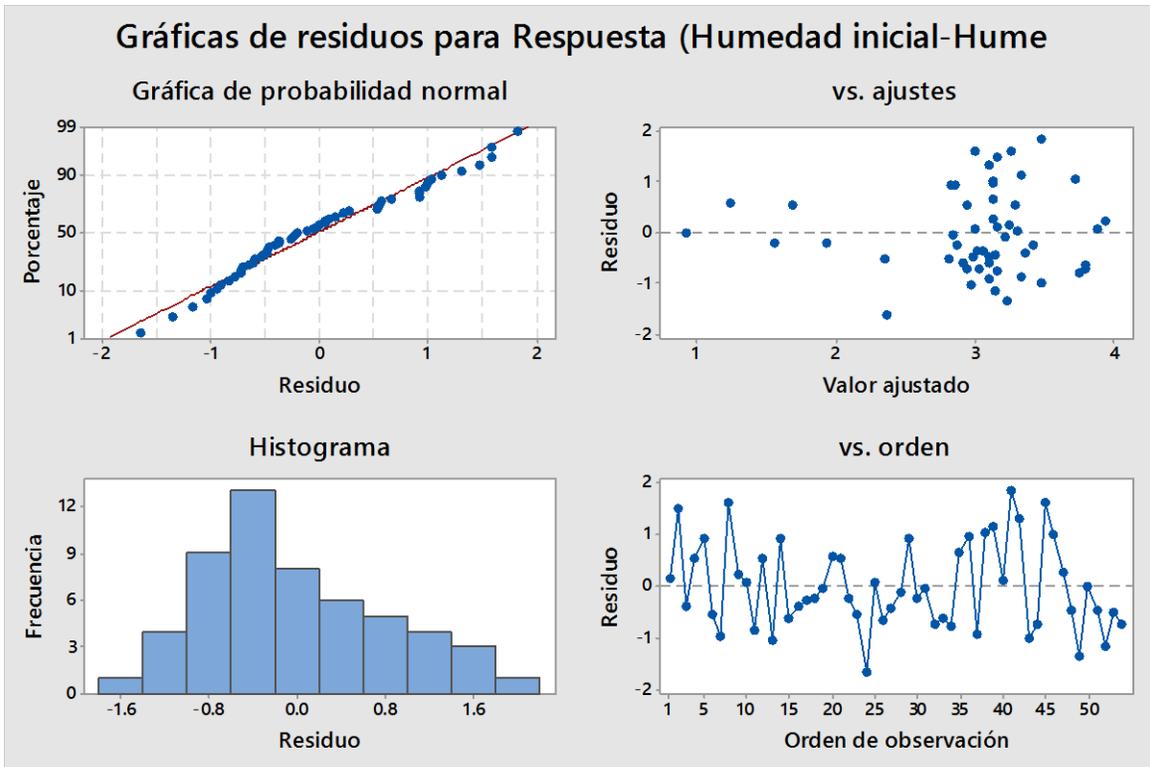
Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que los residuos se ajustan a una distribución normal.

Esta información es respaldada visualmente por el histograma de la gráfica 4.6 antes mencionada, donde se observa que se genera la curva de distribución normal, aunque un tanto asimétrica hacia la derecha. Así mismo, se muestran los residuos vs. ajustes, en donde se observa cierta tendencia de agrupamiento de los residuos y se encuentra presente la no homogeneidad de ellos. Por lo tanto, se deberá hacer una transformación del modelo para poder usarlo como predictor, ya que de lo contrario se descartaría.

Tabla 4.6 Análisis de regresión lineal.

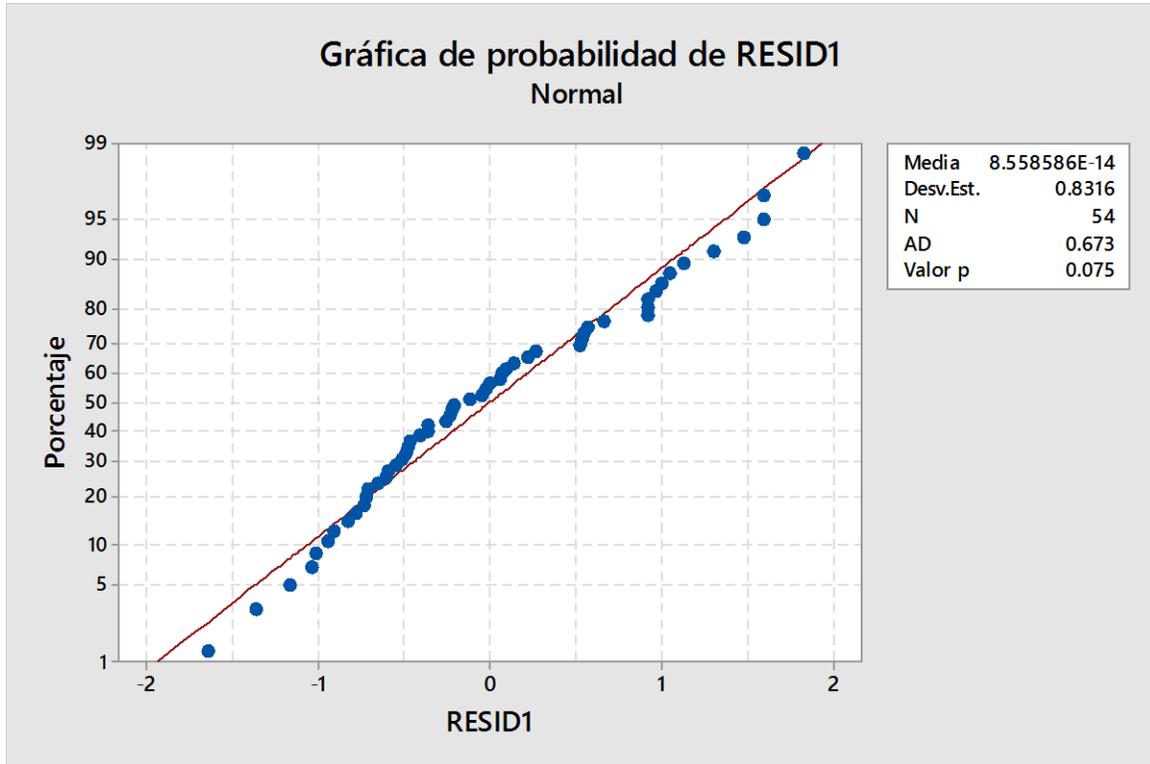
Análisis de regresión: Respuesta (Humedad inicial-Humedad final) vs. Temperatura Cuarto, Humedad Cuarto.				
Análisis de Varianza.				
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F
Regresión	6	19.121	3.1869	4.09
Temperatura Cuarto	1	7.493	7.4932	9.61
Humedad Cuarto	1	7.195	7.1945	9.23
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto	1	4.738	4.7380	6.08
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto	1	3.904	3.9041	5.01
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto	1	10.866	10.8660	13.93
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto	1	4.256	4.2557	5.46
Error	47	36.654	0.7799	
Total	53	55.776		
Fuente		Valor p		
Regresión		0.002		
Temperatura Cuarto		0.003		
Humedad Cuarto		0.004		
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto		0.017		
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto		0.030		
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto		0.001		
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto		0.024		
Error				
Total				
Término		Valor p	VIF	
Constante		0.000		
Temperatura Cuarto		0.003	6746.49	
Humedad Cuarto		0.004	1080.21	
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto		0.017	25087.83	
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto		0.030	531.44	
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto		0.001	179.45	
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto		0.024	6771.82	
Resumen del modelo.				
	S	R-cuad.	R-cuad.	
	R-cuad.	(ajustado)	(pred)	
	0.883110	34.28%	25.89%	17.66%
Ecuación de regresión.				
Respuesta (Humedad inicial-Hume = -109.7 + 4.09 Temperatura Cuarto + 2.793 Humedad Cuarto				
- 0.0703 Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				
- 0.0242 Humedad Cuarto*Humedad Cuarto				
- 0.02674 Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto				
+ 0.000497 Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				
Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.				
Respuesta.				
	(Humedad		Resid	
Obs	inicial-Hume	Ajuste	Resid	est.
18	1.340	1.553	-0.213	X
25	3.060	2.999	0.061	X
41	5.320	3.487	1.833	R
Residuo grande R.				
X poco común X.				

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.6 Residuos para respuesta.

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.7 Probabilidad normal de residuos.

Fuente: Minitab 2018.

Se efectúa un segundo análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método de transformación de Box-Cox óptimo para atender la situación de los residuos en el primer análisis y poder aceptar el modelo como buen predictor.

Considerando todas las interacciones posibles entre las variables independientes y después de realizar los ajustes necesarios en el modelo se obtiene el resumen de regresión en la tabla 4.7 (ver tabla 4.7), del cual se concluye lo siguiente:

En el análisis de varianza (ANOVA) se genera una prueba de hipótesis:

- H0: Las variables independientes no tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P > 0.05$ ).
- H1: Las variables independientes tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P < 0.05$ ).

Los resultados indican que tanto las variables independientes (temperatura del cuarto y humedad del cuarto) como sus interacciones dobles y una interacción triple de temperatura son significativas ( $<0.05$ ). Es decir que las variables independientes influyen sobre la variable dependiente o de respuesta. En otras palabras, tanto la temperatura del cuarto como la humedad del cuarto influyen sobre la reducción del porcentaje de humedad del almidón.

El resumen del modelo incrementó sus coeficientes de correlación con respecto al análisis anterior. Estos coeficientes  $R^2$  y  $R^2$  ajustado, con valores de 39.56% y 31.85% respectivamente, indican que la calidad de ajuste del modelo sigue sin ser muy buena, debido a que se encuentran bajos. Sin embargo, se acepta el modelo de regresión con respecto a su anterior.

La ecuación de regresión permite realizar predicciones sobre la respuesta de acuerdo a diferentes valores de las variables independientes. Mediante esta se puede saber el porcentaje de reducción de humedad dados ciertos valores de temperatura y humedad del cuarto.

Así mismo se siguen encontrando tres observaciones poco comunes en donde se detectaron datos atípicos en la respuesta, debido a causas especiales de variación en el proceso.

Tabla 4.7 Análisis de regresión lineal con transformación Box-Cox.

Análisis de regresión: Respuesta (Humedad inicial-Humedad finale) vs. Temperatura Cuarto, Humedad Cuarto.				
Método.				
transformación de Box-Cox.				
λ redondeado	0.5			
λ estimado	0.4641			
IC de 95% para λ	(-0.0173999, 1.03160)			
Análisis de varianza para respuesta transformada.				
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F
Regresión	6	1.9980	0.33299	5.13
Temperatura Cuarto	1	0.7256	0.72563	11.17
Humedad Cuarto	1	0.6944	0.69440	10.69
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto	1	0.4506	0.45063	6.94
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto	1	0.3642	0.36422	5.61
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto	1	1.0648	1.06479	16.40
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto	1	0.4000	0.40005	6.16
Error	47	3.0524	0.06494	
Total	53	5.0503		
Fuente				Valor p
Regresión				0.000
Temperatura Cuarto				0.002
Humedad Cuarto				0.002
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				0.011
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto				0.022
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto				0.000
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				0.017
Error				
Total				
Resumen del modelo para respuesta transformada.				
	S	R-cuad.	R-cuad.	
		(ajustado)	(pred)	
	0.254841	39.56%	31.85%	24.56%
Término				Valor p
Constante				0.000
Temperatura Cuarto				0.002
Humedad Cuarto				0.002
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				0.011
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto				0.022
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto				0.000
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				0.017
				VIF
Constante				6746.49
Temperatura Cuarto				1080.21
Humedad Cuarto				25087.83
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				531.44
Humedad Cuarto*Humedad Cuarto				179.45
Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto				6771.82
Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				
Ecuación de regresión.				
Respuesta (Humedad inicial-Hume <sup>0.5</sup> = -33.59 + 1.273 Temperatura Cuarto				
+ 0.868 Humedad Cuarto				
- 0.02169 Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				
- 0.00738 Humedad Cuarto*Humedad Cuarto				
- 0.00837 Temperatura Cuarto*Humedad Cuarto				
+ 0.000152 Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto*Temperatura Cuarto				
Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.				
Respuesta original				
	Respuesta			
	(Humedad			
Obs	inicial-Hume	Ajuste		
18	1.340	1.451		
24	0.730	2.240		
25	3.060	2.978		

---

Respuesta transformada.

Obs	Humedad inicial	Humedad final	Ajuste	Residuo	Residuo est.	
18	1.158	1.204	-0.047	-0.34	X	
24	0.854	1.497	-0.642	-2.64	R	
25	1.749	1.726	0.024	0.24	X	

Respuesta (Humedad inicial-Humedad final) = respuesta transformada.  
Residuo grande R.  
X poco común X.

---

*Fuente: Minitab 2018.*

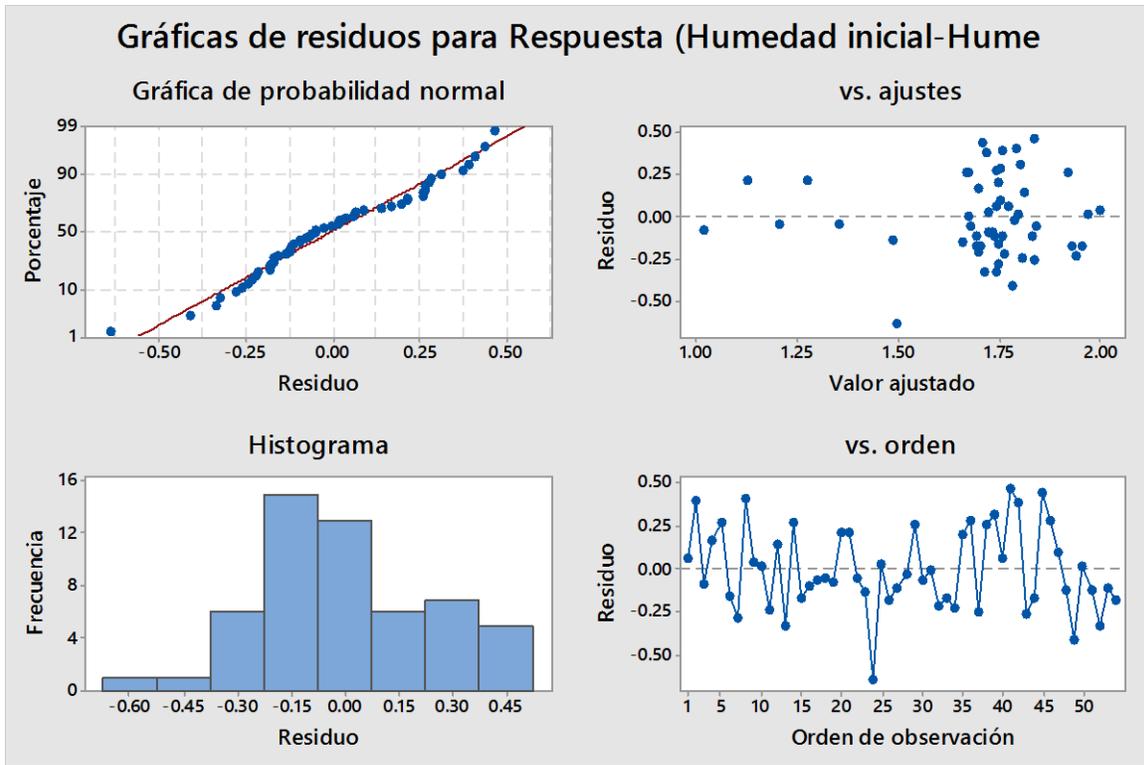
Se realiza un resumen gráfico para observar el comportamiento de los residuos generados durante el análisis de regresión con transformación Box- Cox (ver gráfica 4.8). La gráfica de cuatro en uno muestra la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de residuos vs. ajustes, el histograma y la gráfica de residuos vs. orden.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuos se ajustan a una distribución normal, se realiza la prueba de normalidad mediante el estadístico Anderson-Darling en la gráfica 4.9 (ver gráfica 4.9) en la que se muestra un estadístico  $A^2$  de 0.579 y un valor P de 0.126. Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$ 
  - H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).
  - H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ ).
- Para el valor P
  - H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P > 0.05).
  - H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P < 0.05).

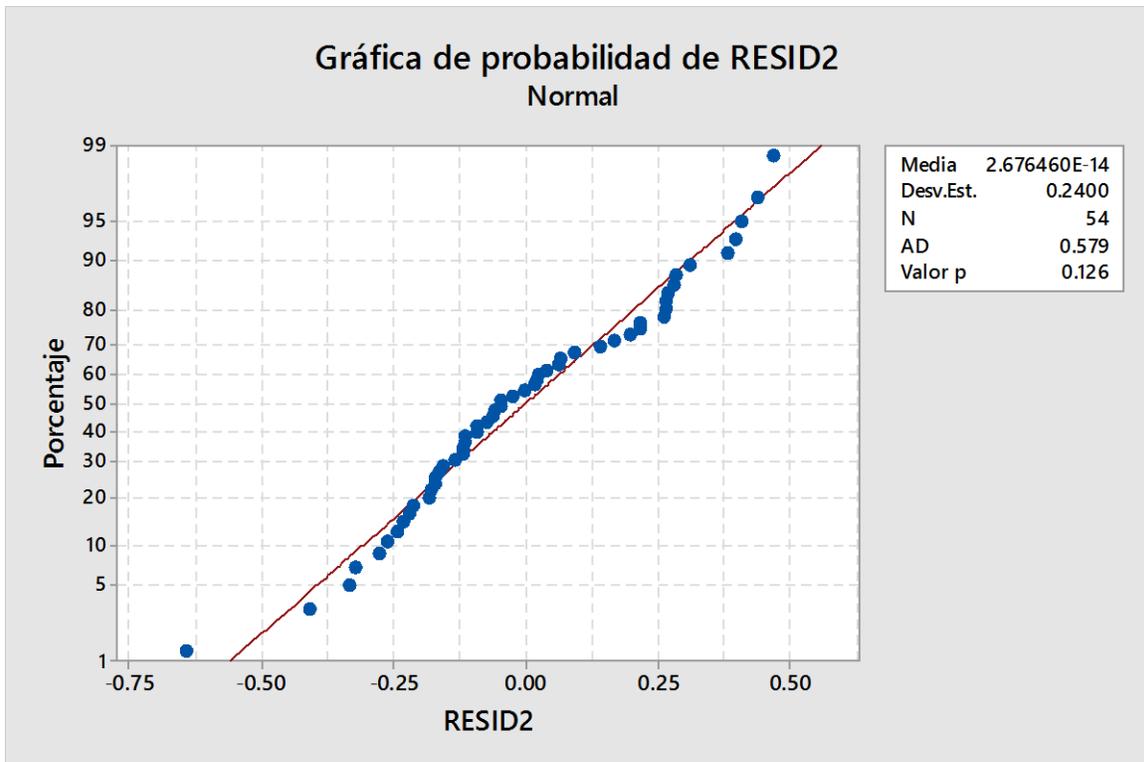
Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que los residuos se ajustan a una distribución normal.

Esta información es respaldada visualmente por el histograma de la gráfica 4.8 antes mencionada, donde se observa que se genera la curva de distribución normal mejor proporcionada. Así mismo, se muestran los residuos vs. ajustes, en donde se observa cierta tendencia de agrupamiento de los residuos y se encuentra presente la no homogeneidad de ellos. Sin embargo, se acepta el modelo de regresión como predictor ya que sirve de base para realizar el diseño de experimentos en el cuarto de secado.



Gráfica 4.8 Residuos para respuesta.

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.9 Probabilidad normal de residuos.

Fuente: Minitab 2018.

### 4.5.3 OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA

Se realiza un análisis de optimización de respuesta preliminar con la finalidad de saber el punto óptimo de las variables independientes (temperatura del cuarto y humedad del cuarto) para maximizar el porcentaje de la diferencia de humedad de entrada y de salida del almidón, es decir, maximizar la respuesta.

Se muestran los resultados del análisis en la tabla 4.8 y en la gráfica 4.10 (ver tabla 4.8 y gráfica 4.10). Se obtiene que la temperatura del cuarto se debe encontrar a 59.4° C y la humedad del cuarto a 25.1152%, para tener una respuesta promedio de 4.41576% de reducción de humedad en el almidón. Este valor se moverá dentro del intervalo de confianza a un 95%, con posibilidad de adquirir valores desde 3.38545% hasta 5.58274%.

Tabla 4.8 Optimización de respuesta.

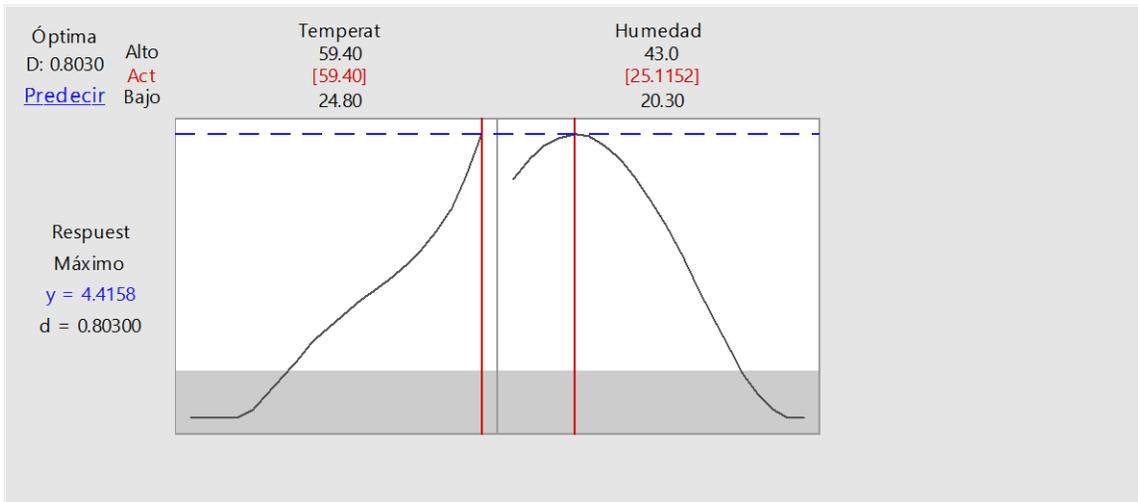
Optimización de respuesta: Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).					
Parámetros.					
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación
Respuesta (Humedad inicial-Hume	Máximo	0.73	5.32		1
Respuesta	Importancia				
Respuesta (Humedad inicial-Hume			1		
Solución.					
	Temperatura Cuarto	Respuesta (Humedad inicial-Hume	Deseabilidad		
Solución	Cuarto	Ajuste	compuesta		
1	59.4	25.1152	4.41576	0.802997	
Predicción de respuesta múltiple.					
Variable	Valor de configuración				
Temperatura Cuarto	59.4				
Humedad Cuarto	25.1152				
Respuesta	Ajuste	IC de 95%	IP de 95%		
Respuesta (Humedad inicial-Hume	4.41576	(3.38545, 5.58274)	(2.32836, 7.16549)		

Fuente: Minitab 2018.

### 4.5.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con base en la información analizada anteriormente, se realiza un diseño de experimentos en el cuarto de secado con la finalidad de hallar los niveles óptimos de los factores de temperatura y humedad del cuarto, para maximizar el porcentaje de la diferencia de humedades de entrada y de salida del almidón de maíz.

Gráfica 4.10 Optimización de respuesta.



Fuente: Minitab 2018.

El diseño de experimentos consiste en un diseño factorial de múltiples niveles, específicamente un diseño  $3^2$ , en donde los factores son la temperatura y humedad del cuarto; y los niveles son: alto, medio y bajo, los cuales se muestran en la tabla 4.9 (ver tabla 4.9).

Tabla 4.9 Niveles de factores.

Niveles de factores.			
Factor.	Nivel		
	Alto.	Medio.	Bajo.
Temperatura (°C).	65	60	55
% de Humedad.	25	20	15

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

Teniendo en cuenta los niveles establecidos para cada factor, se presenta el orden de las corridas de nueve experimentos base en la tabla 4.10 (ver tabla 4.10), en donde a cada factor le corresponde un nivel de temperatura y humedad.

Las condiciones del diseño consisten en realizar los experimentos de la misma manera, es decir, utilizar 1014 cajones con almidón en el cuarto de secado, usar el mismo acomodo de tarimas en el interior del cuarto (tarimas chicas del lado izquierdo y tarimas grandes del lado derecho), tener una temperatura del tanque de agua mayor o igual  $80^{\circ}\text{C}$ , y parar el cuarto una vez alcanzado el valor programado de temperatura y humedad. Los resultados de los experimentos se muestran en el formato REG-AC-011 y REG-AC-012 del anexo 4 y 5 respectivamente (ver anexo 4 y 5) y parte de estos se muestran en la tabla 4.11 y 4.12 (ver tabla 4.11 y 4.12), las cuales incluyen los siguientes apartados: programa de cuarto, hora,

temperatura cuarto, humedad cuarto, temperatura tanque, humedad ambiente, temperatura ambiente y presión caldera; muestra, humedad inicial de almidón, humedad final de almidón y respuesta (humedad inicial – humedad final).

Tabla 4.10 Diseño factorial.

Diseño factorial de múltiples niveles.						
Factores:	2	Réplicas:	1			
Corridas base:	9	Total de corridas:	9			
Bloques base:	1	Total de bloques:	1			
Número de niveles: 3, 3						
OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Temperatura	Humedad	
7	1	1	1	65	15	
2	2	1	1	55	20	
9	3	1	1	65	25	
8	4	1	1	65	20	
6	5	1	1	60	25	
5	6	1	1	60	20	
1	7	1	1	55	15	
4	8	1	1	60	15	
3	9	1	1	55	25	

Fuente: Minitab 2018.

La corrida experimental se realiza tomando en cuenta diez repeticiones de cada combinación base, obteniéndose en total noventa experimentos. Los resultados del arreglo aleatorio se muestran en el formato REG-AC-013 del anexo 6 (ver anexo 6) y parte de estos se muestran en la tabla 4.13 (ver tabla 4.13), la cual incluye los siguientes apartados: orden estándar, orden corrida, tipo pt, bloques, temperatura, humedad, respuesta y humedad final.

Se efectúa el análisis factorial de estos datos considerando todas las interacciones posibles entre las variables independientes. Después de realizar los ajustes necesarios en el modelo se obtiene el resumen del análisis en la tabla 4.14 (ver tabla 4.14), del cual se concluye lo siguiente:

En el análisis de varianza (ANOVA) se genera una prueba de hipótesis:

- H0: Las variables independientes no tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P > 0.05$ ).
- H1: Las variables independientes tienen influencia sobre la variable dependiente (valor  $P < 0.05$ ).

Los resultados indican que tanto las variables independientes (temperatura del cuarto y humedad del cuarto) como su interacción, son significativas ( $<0.05$ ). Es decir, que éstas influyen sobre la variable dependiente o de respuesta. En otras palabras, tanto la temperatura del cuarto como la humedad del cuarto influyen sobre la reducción del porcentaje de humedad del almidón.

Tabla 4.11 Variables del proceso de secado durante la corrida experimental.

Variables de proceso de secado.							
Programa de cuarto.	Hora.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.
65-20	22	27.1	47.4	80	53	24.7	100
	23	47.4	24.5	80	54	23.1	95
	24	50.3	24.5	80	53	23.1	100
	1	53.6	24.2	85	53	22.7	95
	2	56.3	23.2	90	55	22.6	95
	3	59	22.2	90	57	22.4	90
	4	61.2	20.7	95	58	22.2	90
	5	62.4	19.8	95	57	23	90
65-15	6	63.3	19	90	57	21.5	100
	7	63.4	18.6	90	57	21	100
	21	51.9	33.2	90	50	26.1	80
	22	53.4	32.9	85	51	21.1	100
	23	55.8	31.7	85	51	20.8	100
	24	58.4	29.5	85	51	20.2	100
	1	60.3	28.8	90	50	20.3	90
	2	61.6	26.3	90	48	20.3	90
60-15	3	62.1	24.1	90	48	20	100
	4	62.3	22.4	90	46	19.5	100
	5	63.2	21.3	90	48	19.5	90
	6	63.8	20.1	90	50	19.6	90
	22	55.2	29.2	95	46	19.2	95
	23	57	26.9	90	48	18.3	90
	24	57.5	25.9	90	48	18.7	100
	1	57.9	24.8	91	48	18.6	95
2	58.5	23.7	91	49	18.5	95	
3	58.9	22.5	90	49	18.1	100	
4	59.4	21.3	91	50	17.8	100	
5	59.7	20.4	92	51	17.3	96	
6	59.9	19.7	88	52	17.1	100	
7	60	19.4	88	53	17.1	100	

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

Tabla 4.12 Muestreo de almidón durante la corrida experimental.

Almidón				
Programa de cuarto.	Muestra.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
65-20	1	8.46	4.81	3.65
	2	7.33	4.99	2.34
	3	7.33	5.95	1.38
	4	8.27	6.67	1.6
	5	8.25	6.31	1.94
	6	8.73	6.16	2.57
	7	8.84	6.59	2.25
	8	8.88	6.01	2.87
	9	7.78	5.56	2.22
	10	7.56	5.75	1.81
65-15	1	9.98	4.8	5.18
	2	9.24	4.74	4.5
	3	8.27	5.08	3.19
	4	7.96	4.85	3.11
	5	10.09	5.35	4.74
	6	8.63	6.22	2.41
	7	9.34	4.66	4.68
	8	8.88	4.74	4.14
	9	8.12	5.96	2.16
	10	9.63	5.86	3.77
60-15	1	9.08	4.39	4.69
	2	8.88	5.3	3.58
	3	8.18	4.77	3.41
	4	8.47	4.01	4.46
	5	8.66	4.96	3.7
	6	8.83	5.83	3
	7	8.98	5.15	3.83
	8	9.6	5.33	4.27
	9	8.93	5.37	3.56
	10	7.21	5.41	1.8

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

El resumen del modelo indica mediante los coeficientes de correlación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado (53.96% y 49.41% respectivamente) que la calidad de ajuste del modelo no es muy buena, debido a que estos coeficientes se encuentran bajos. Sin embargo, se acepta el modelo como predictor para del diseño de experimentos.

Tabla 4.13 Corrida de experimentos.

OrdenEst.	OrdenCorrida.	TipoPt.	Bloques.	Temperatura.	Humedad.	Respuesta.	Humedad final.
47	1	1	1	55	20	1.93	5.84
51	2	1	1	60	25	4.13	5.12
10	3	1	1	55	15	2.05	5.8
74	4	1	1	55	20	2.64	6.26
59	5	1	1	60	20	3.66	4.52
28	6	1	1	55	15	2.61	5.07
69	7	1	1	60	25	2.24	5.86
76	8	1	1	60	15	4.69	4.39
31	9	1	1	60	15	3.58	5.3
89	10	1	1	65	20	3.65	4.81
61	11	1	1	65	15	5.18	4.8
60	12	1	1	60	25	3.25	5.73
18	13	1	1	65	25	5.23	4.53
26	14	1	1	65	20	2.34	4.99
56	15	1	1	55	20	1.7	5.63
37	16	1	1	55	15	2.76	5.13
90	17	1	1	65	25	5.27	4.36
29	18	1	1	55	20	2.81	6.13
9	19	1	1	65	25	3.75	5.4
71	20	1	1	65	20	1.38	5.95
73	21	1	1	55	15	1.86	6.24
2	22	1	1	55	20	2.38	5.58
5	23	1	1	60	20	0.57	6.7
33	24	1	1	60	25	0.89	6.39
48	25	1	1	55	25	0.81	7.67
24	26	1	1	60	25	1.45	5.93
53	27	1	1	65	20	1.6	6.67
22	28	1	1	60	15	3.41	4.77
84	29	1	1	55	25	1.42	7.48
68	30	1	1	60	20	3.1	4.68
12	31	1	1	55	25	2.27	6.72
21	32	1	1	55	25	2.93	6.42
34	33	1	1	65	15	4.5	4.74
38	34	1	1	55	20	1.71	6.01

Fuente: Minitab 2018.

La ecuación de regresión permite realizar predicciones sobre la respuesta de acuerdo a diferentes valores de las variables independientes. Mediante esta se puede saber el porcentaje de reducción de humedad dados ciertos valores de temperatura y humedad del cuarto.

Así mismo se encuentran cinco observaciones poco comunes en donde se detectaron datos atípicos en la respuesta (humedad inicial - humedad final), debido a causas especiales de variación en el proceso.

Se realiza un resumen gráfico para observar el comportamiento de los residuos generados durante el análisis de regresión general del diseño de experimentos (ver gráfica 4.11). La gráfica de cuatro en uno muestra la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de residuos vs. ajustes, el histograma y la gráfica de residuos vs. orden.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuos se ajustan a una distribución normal, se realiza la prueba de normalidad mediante el estadístico Anderson-Darling en la gráfica 4.12 (ver gráfica 4.12) en la que se muestra un estadístico  $A^2$  de 0.282 y un valor P de 0.629. Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

- Para el estadístico  $A^2$ 
  - H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).
  - H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ ).
- Para el valor P
  - H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P  $> 0.05$ ).
  - H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P  $< 0.05$ ).

Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que los residuos se ajustan a una distribución normal.

Esta información es respaldada visualmente por el histograma de la gráfica 4.11 (ver gráfica 4.11), en donde se aprecia que se genera la curva de distribución normal con asimetría hacia la derecha. Así mismo, se muestran los residuos vs. ajustes, en donde se observan tendencias de agrupamiento de los residuos y se encuentra presente la no homogeneidad de ellos. Sin embargo, se acepta el modelo de regresión factorial general del diseño de experimentos.

#### **4.6 MEDIDAS DE MEJORA**

Se realiza el análisis de optimización de respuesta del diseño de experimentos con la finalidad de saber el punto óptimo de las variables independientes (temperatura del cuarto y humedad del cuarto) para maximizar el porcentaje de la diferencia de humedades de entrada y salida del almidón, es decir, maximizar la respuesta.

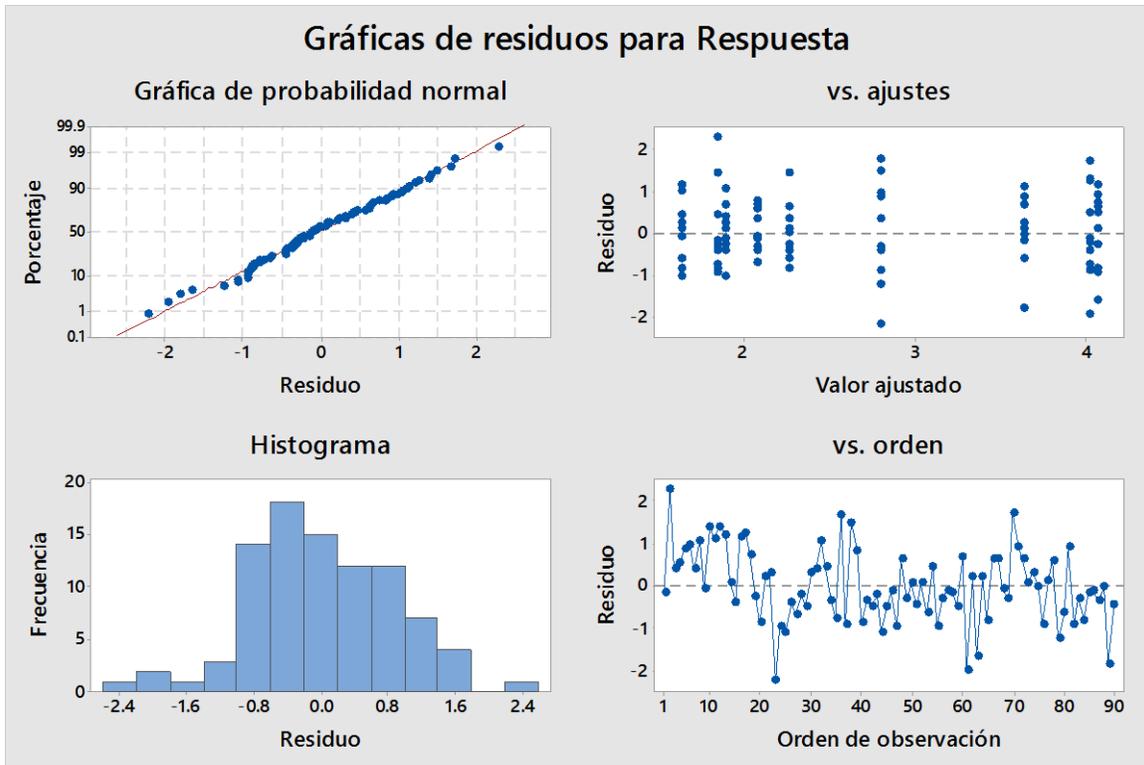
Tabla 4.14 Regresión factorial.

Regresión factorial general: Respuesta vs. Temperatura, Humedad.						
Información del factor.						
Factor	Niveles	Valores				
Temperatura	3	55, 60, 65				
Humedad	3	15, 20, 25				
Análisis de Varianza.						
Fuente		GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo		8	75.939	9.4924	11.86	0.000
Lineal		4	46.367	11.5919	14.49	0.000
Temperatura		2	37.854	18.9268	23.66	0.000
Humedad		2	8.514	4.2569	5.32	0.007
Interacciones de 2 términos		4	29.572	7.3929	9.24	0.000
Temperatura*Humedad		4	29.572	7.3929	9.24	0.000
Error		81	64.805	0.8001		
Total		89	140.745			
Resumen del modelo.						
	S	R-cuad.	R-cuad.			
		(ajustado)	(pred)			
	0.894464	53.96%	49.41%	43.15%		
Ecuación de regresión.						
Respuesta = 2.6927 - 0.826 Temperatura_55 + 0.067 Temperatura_60 + 0.759 Temperatura_65						
+ 0.418 Humedad_15 - 0.312 Humedad_20 - 0.106 Humedad_25						
- 0.651 Temperatura*Humedad_55 15 + 0.522 Temperatura*Humedad_55 20						
+ 0.129 Temperatura*Humedad_55 25 + 0.452 Temperatura*Humedad_60 15						
+ 0.354 Temperatura*Humedad_60 20 - 0.806 Temperatura*Humedad_60 25						
+ 0.199 Temperatura*Humedad_65 15 - 0.876 Temperatura*Humedad_65 20						
+ 0.677 Temperatura*Humedad_65 25						
Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.						
			Resid			
Obs	Respuesta	Ajuste	Resid	est.		
2	4.130	1.848	2.282	2.69	R	
23	0.570	2.801	-2.231	-2.63	R	
61	2.050	4.022	-1.972	-2.32	R	
70	4.530	2.801	1.729	2.04	R	
89	1.800	3.630	-1.830	-2.16	R	
Residuo grande R						

Fuente: Minitab 2018.

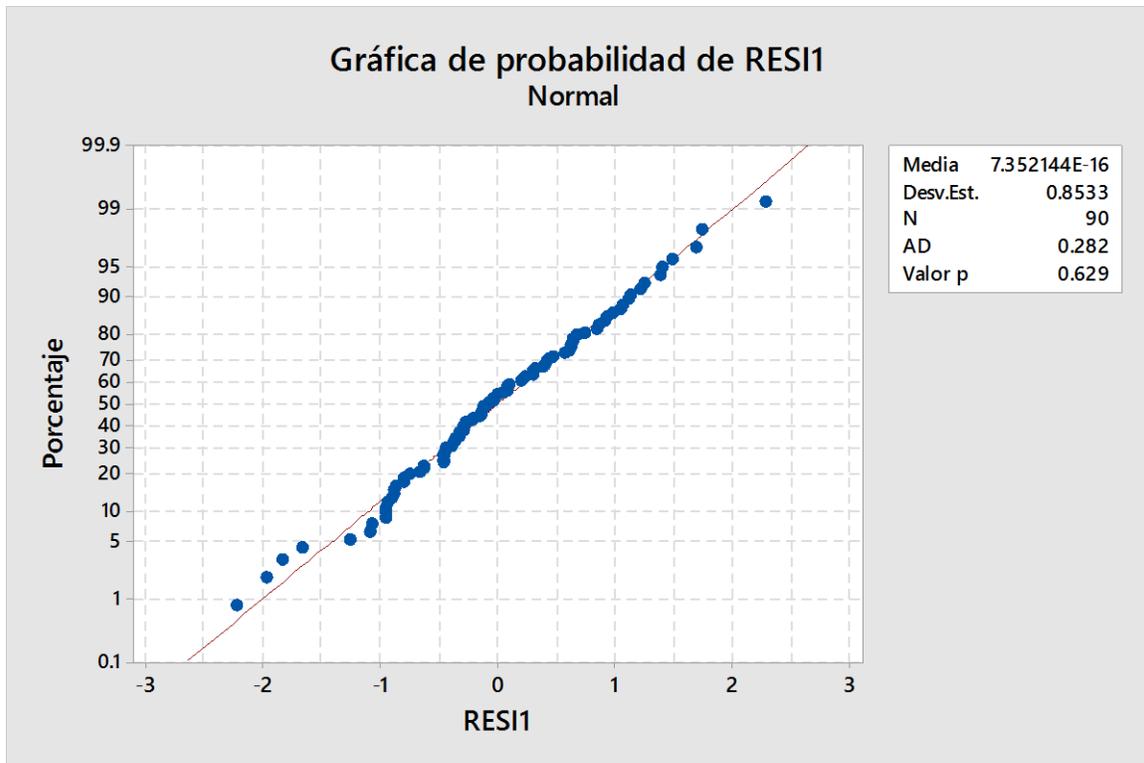
Se muestran los resultados del análisis en la tabla 4.15 y en la gráfica 4.13 (ver tabla 4.15 y gráfica 4.13). Se obtiene que la temperatura del cuarto se debe encontrar a 65 °C y la humedad del cuarto a 15%, para tener una respuesta promedio de 4.069% de reducción de humedad en el almidón durante 13 horas de funcionamiento. Este valor se moverá dentro del intervalo de confianza a un 95%, con posibilidad de adquirir valores desde 3.506% hasta 4.632%.

Esta información también se muestra respaldada en la gráfica 4.14 (ver gráfica 4.14), en la cual se analiza que el punto que cada factor maximiza a la media de la respuesta, se encuentra en el nivel 65 para la temperatura y en el nivel 15 para la humedad.



Gráfica 4.11 Resumen gráfico de residuos para respuesta.

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.12 Probabilidad normal.

Fuente: Minitab 2018.

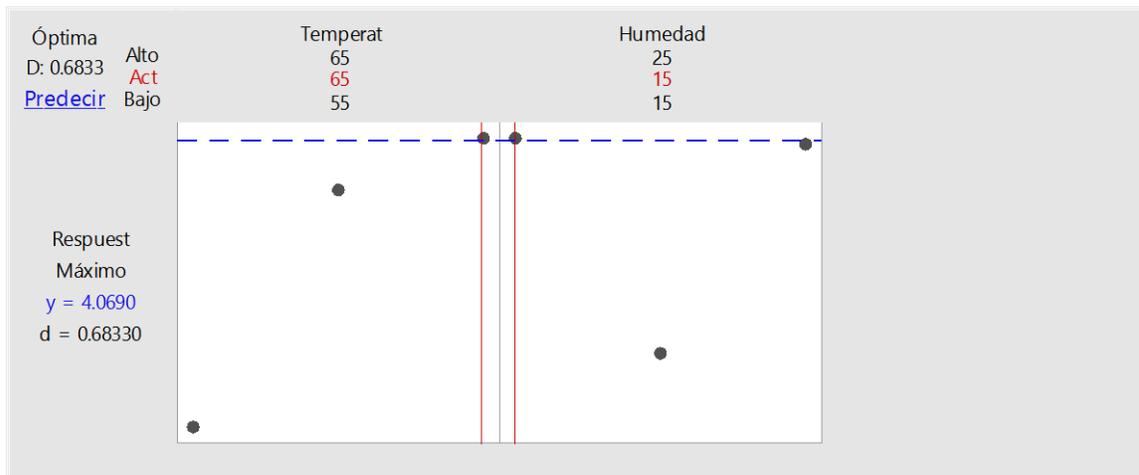
Tabla 4.15 Optimización de respuesta del diseño de experimentos.

Optimización de respuesta: Respuesta					
Parámetros.					
Respuesta Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Respuesta Máximo	0.55	5.7		1	1
Solución.					
Solución	Temperatura	Humedad	Ajuste	Deseabilidad compuesta	
1	65	15	4.069	0.683301	
Predicción de respuesta múltiple.					
Variable	Valor de configuración				
Temperatura	65				
Humedad	15				
Respuesta	EE de				
Respuesta	Ajuste	ajuste	IC de 95%	IP de 95%	
Respuesta	4.069	0.283	(3.506, 4.632)	(2.202, 5.936)	

Fuente: Minitab 2018.

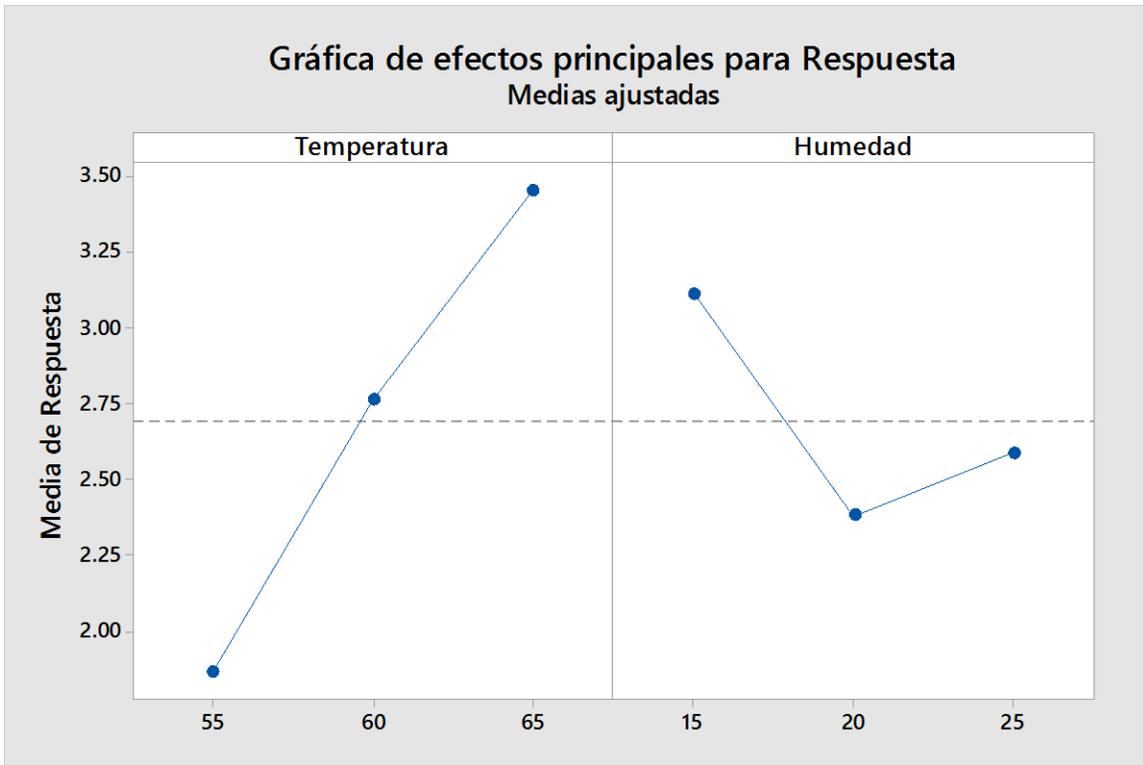
En la gráfica 4.15 (ver gráfica 4.15), se analiza que el contorno con tonalidad más oscura es el área correspondiente a la combinación 65 de temperatura y 15 de humedad; en la cual se presenta una respuesta promedio mayor a 3.5% de reducción de humedad.

Igualmente, en la gráfica 4.16 (ver gráfica 4.16), se detecta que la combinación óptima que maximiza la respuesta y que contiene el contorno con oscuridad mayor, es 65 de temperatura y 15 de humedad.



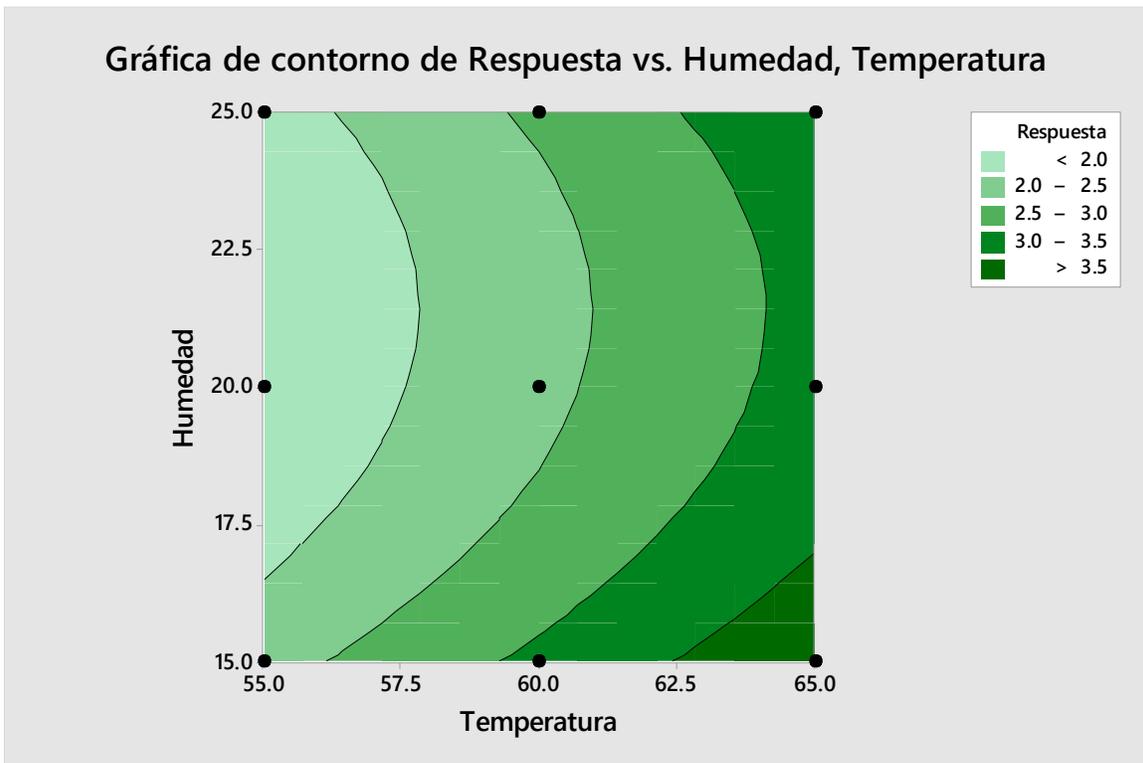
Gráfica 4.13 Optimización de respuesta del diseño de experimentos.

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.14 Efectos principales para respuesta.

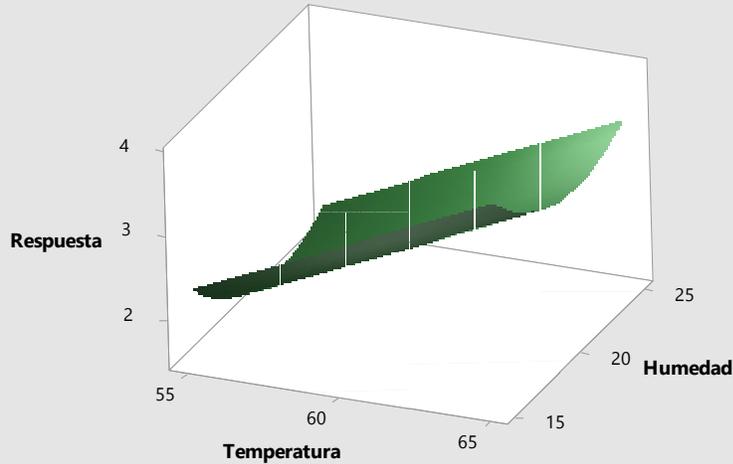
Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.15 Contorno de superficie de respuesta.

Fuente: Minitab 2018.

### Gráfica de superficie de Respuesta vs. Humedad, Temperatura



Gráfica 4.16 Superficie de respuesta.

Fuente: Minitab 2018.

Se realiza un estudio del consumo de energía eléctrica del cuarto de secado comparando las horas de funcionamiento anteriores contra las actuales (después de la mejora). En la tabla 4.16 (ver tabla 4.16), se muestra un resumen del análisis que incluye las horas de funcionamiento por corrida (20 horas antes de la mejora, 13 horas después de la mejora), el consumo de energía del cuarto (11 kw/h) y el costo de energía por kw/h (\$1.047).

Se obtiene que la energía eléctrica consumida por corrida es de 220 kw antes de la mejora, lo que implica un costo por corrida de \$230.34 equivalente a \$6910.2 mensuales.

La energía eléctrica consumida después de la aplicación de la mejora es de 143 kw, lo que implica un costo por corrida de \$149.721 equivalente a \$4491.63 mensuales; generando un ahorro de \$2418.57 mensuales.

Tabla 4.16 Consumo de energía.

	Horas de funcionamiento por corrida	Energía consumida (kw/h)	Costo de energía por kw/h (\$)	Energía consumida por corrida (kw)	Costo de energía consumida por corrida	Costo de energía consumida mensual
Antes	20	11	1.047	220	\$230.34	\$6910.2
Después	13			143	\$149.721	\$4491.63

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

## 4.7 MEDIDAS DE CONTROL

Se llevan a cabo cuatro corridas prueba utilizando la combinación óptima de temperatura y humedad del cuarto de secado, con la finalidad de comprobar el comportamiento de la respuesta; en la cual se obtiene como promedio 3.737% de reducción de humedad en el almidón de maíz. Cumpliéndose con el intervalo de confianza a un 95%, los valores van desde 3.506 % hasta 4.632 %, exceptuando 4 datos que se encuentran fuera de este rango.

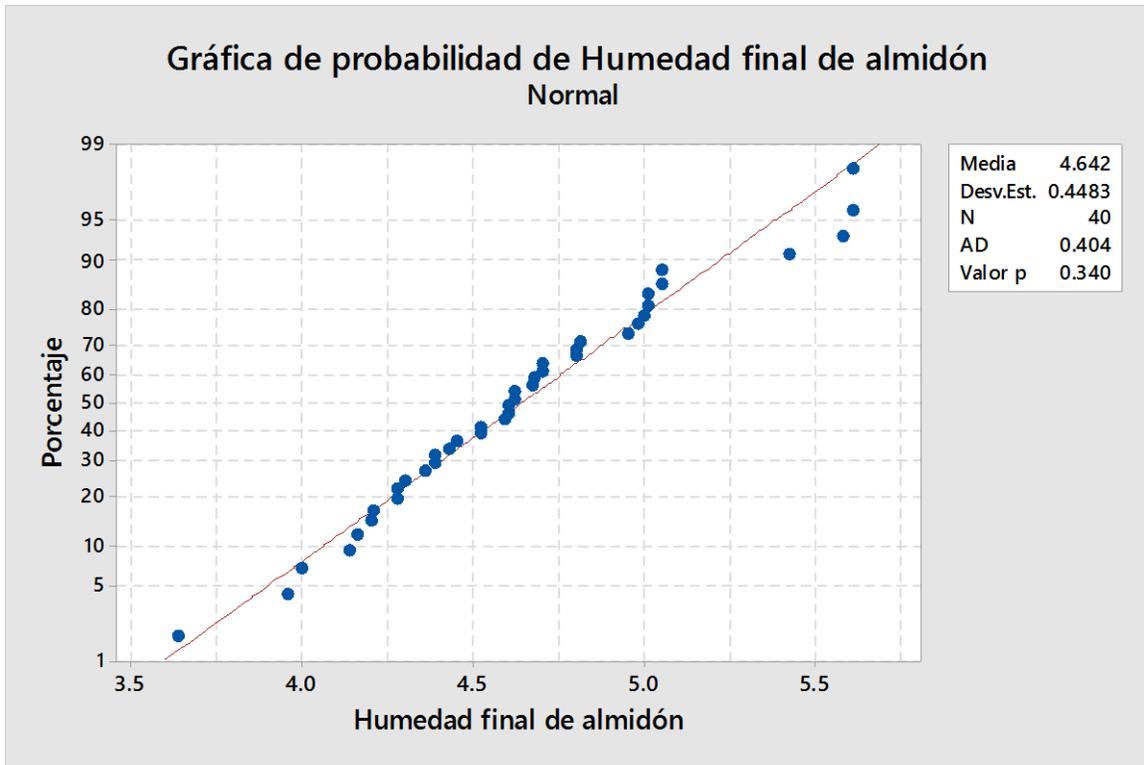
Las condiciones de las corridas prueba se respetaron al igual que en las corridas experimentales. Se utilizaron 1014 cajones con almidón en el cuarto de secado, se usó el mismo acomodo de tarimas en el interior del cuarto (tarimas chicas del lado izquierdo y tarimas grandes del lado derecho), la temperatura del tanque de agua fue mayor o igual a 80°C, y se paró el cuarto una vez alcanzado el tiempo de 13 horas ya que es el destinado para la combinación óptima. Los resultados de las corridas se muestran en el formato REG-AC-014 del anexo 7 (ver anexo 7) y parte de estos en la tabla 4.17 (ver tabla 4.17), la cual incluye los siguientes apartados: no. corrida, temperatura cuarto, humedad cuarto, temperatura tanque, humedad ambiente, temperatura ambiente, presión caldera, muestra, humedad inicial de almidón, humedad final de almidón y respuesta (humedad inicial – humedad final).

Se realizan pruebas de normalidad sobre los datos de la columna humedad final de almidón y sobre la columna de la respuesta, con la finalidad de asegurar que las pruebas tuvieron un comportamiento normal.

El estadístico Anderson-Darling en las gráficas 4.17 y 4.18 (ver gráfica 4.17 y 4.18) en las que se muestra un estadístico  $A^2$  de 0.404, un valor P de 0.340; y un estadístico  $A^2$  de 0.513 y un valor P de 0.183 respectivamente. Se crean las pruebas de hipótesis siguientes para concluir el resultado:

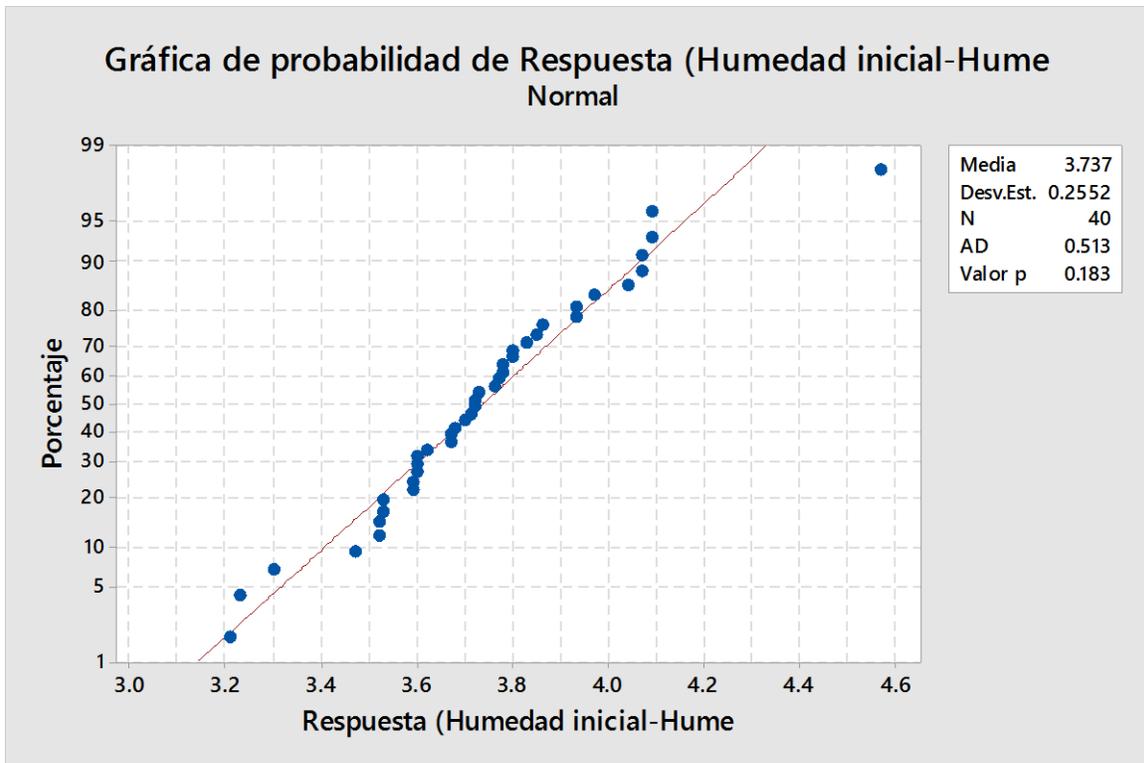
- Para el estadístico  $A^2$   
H0: Los datos se ajustan a una distribución normal ( $A^2 < 0.751$ ).  
H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal. ( $A^2 > 0.751$ )
- Para el valor P  
H0: Los datos se ajustan a una distribución normal (valor P > 0.05).  
H1: Los datos no se ajustan a una distribución normal (valor P < 0.05).

Dado los estadísticos  $A^2$  y valor P significativos, se concluye que los datos de las corridas de prueba tienen un comportamiento normal.



Gráfica 4.17 Probabilidad normal de corridas.

Fuente: Minitab 2018.



Gráfica 4.18 Probabilidad normal de corridas para respuesta.

Fuente: Minitab 2018.

Tabla 4.17 Corridas de prueba.

No. Corrida.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.	Muestra.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
Corrida prueba 1	31.9	23	97	41	25.8	100	1	8.71	4.66	4.05
	51	14	97	42	25.5	100	2	7.59	4.03	3.56
	27.2	15	80	48	23.6	100	3	8.27	4.51	3.76
	57.7	14.8	80	47	22.6	100	4	8.3	4.49	3.81
	59.3	14.4	85	47	22.1	100	5	8.47	4.89	3.58
	60.8	14	90	45	21.8	90	6	8.72	5.21	3.51
	62.6	13.5	90	46	21.2	90	7	8.8	5.26	3.54
	64.6	13	90	46	20.7	100	8	7.61	4.17	3.44
	65.5	12.5	90	47	20.1	100	9	8.87	5.2	3.67
	63.4	12.9	95	46	19.9	100	10	9.07	5.33	3.74
Corrida prueba 2	22.7	19	80	34	23.4	100	1	7.77	4	3.77
	44.1	14	80	30	26.5	80	2	8.34	4.3	4.04
	52.4	14.6	83	33	29.1	100	3	8.41	4.68	3.73
	55.1	15.5	79	29	29.9	100	4	8.49	4.81	3.68
	56.6	15.3	84	28	29.7	100	5	8.21	4.36	3.85
	58.7	16	85	30	26.9	100	6	7.35	3.64	3.71
	59.3	15.6	85	30	25.8	100	7	8.29	4.43	3.86
	59.6	15.4	80	30	25.7	90	8	8.21	4.98	3.23
	60	15.2	85	30	25.1	100	9	8.8	5	3.8
							10	9.2	5.58	3.62
Corrida prueba 3	27.5	29.2	80	34	28.2	100	1	7.93	3.96	3.97
	47.7	18.7	84	31	29.6	100	2	7.41	4.2	3.21
	51.3	18.6	83	31	30.3	100	3	7.61	4.14	3.47
	56.3	19.3	86	34	30.7	100	4	8.42	4.59	3.83
	57.5	19.3	90	33	30.6	100	5	7.97	4.67	3.3
	60.4	19.1	90	32	30.4	100	6	8.78	4.21	4.57
	62.8	18.7	92	35	29	100	7	9.12	5.42	3.7
	63.2	18.7	90	36	28.9	100	8	7.92	4.16	3.76
	63.8	17.6	92	38	26.1	90	9	8.25	4.45	3.8
							10	8.55	4.95	3.6

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.

#### 4.7.1 CAPACIDAD DE PROCESO

Se realiza un nuevo análisis de la capacidad de proceso con la finalidad de conocer el desempeño mejorado de éste, a través de la determinación de la amplitud de la variación

natural para la característica de humedad final del almidón. Para así saber en qué medida es satisfactoria (cumple especificaciones).

El análisis se lleva a cabo utilizando la columna de humedad final de almidón en el formato REG-AC-014 del anexo 7 mencionado anteriormente (ver anexo 7). Se presenta el informe en la gráfica 4.19 (ver gráfica 4.19), en la cual se considera un tamaño de subgrupo de 5 para un número de muestra de 40 datos. Los límites de especificación inferior y superior son dados a partir de los requerimientos del proceso en cuanto a la humedad final del almidón de maíz (3.5% y 6.5% respectivamente), y el objetivo es dado por la condición óptima del almidón (5.5% de humedad).

De acuerdo con el indicador de la capacidad potencial del proceso ( $C_p$ ) de 1.12, se concluye que el proceso es capaz de cumplir con especificaciones ya que es mayor a 1. Sin embargo, se considera parcialmente adecuado y necesita de un control estricto para alcanzar una calidad satisfactoria. En el corto plazo se estiman 5127 muestras de humedad por cada millón que están fuera de especificaciones.

De acuerdo con el indicador de la capacidad real del proceso ( $C_{pk}$ ) de 0.86, se concluye que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones dado que es menor a 1.25. Es decir, se encuentra descentrado.

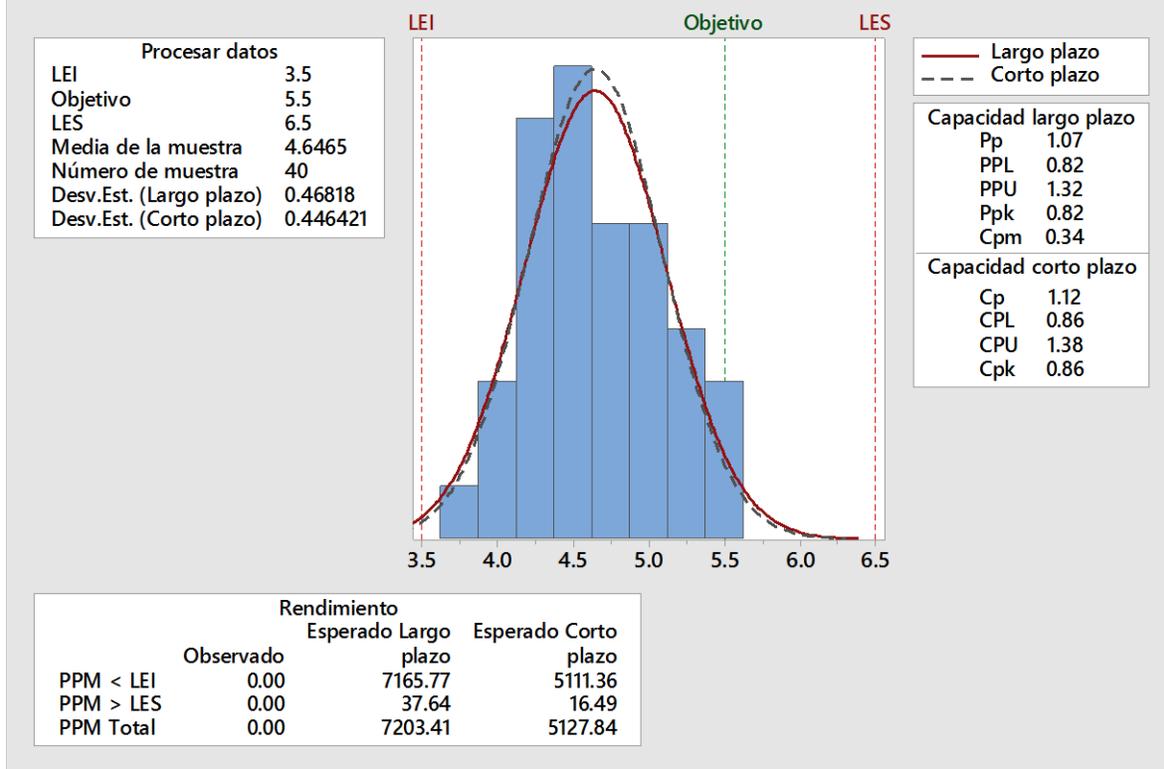
De esta manera, concluye que el proceso es capaz pero no es estable en cuanto a la media de la humedad final del almidón.

#### 4.7.2 CURVA DE SECADO

Se obtiene la curva de secado del almidón de maíz con el propósito de pronosticar el tiempo necesario de funcionamiento del cuarto de secado partiendo de una humedad inicial del almidón, para obtener un porcentaje de humedad final deseado de éste (que cumpla con los requerimientos del producto a fabricar). El estudio se lleva a cabo considerando 1209 cajones con almidón en el interior del cuarto durante un tiempo de funcionamiento de 8 horas, utilizando el arreglo de tarimas del formato REG-AC-017 del anexo 10 (ver anexo 10) y con bases de fierro en lugar de tarimas ya que permiten mayor circulación del aire; cada hora se realiza un muestreo del cajón inferior de la base ubicada en la esquina inferior izquierda del cuarto, e inmediatamente se lleva la muestra a analizar a la termo-balanza.

Se muestran los resultados en la tabla 4.18 (ver tabla 4.18), en donde el tiempo es la variable independiente ( $x$ ) y la humedad es la variable dependiente o de respuesta ( $y$ ).

## Informe de capacidad del proceso de Humedad final de almidón



Gráfica 4.19 Informe de capacidad de proceso.

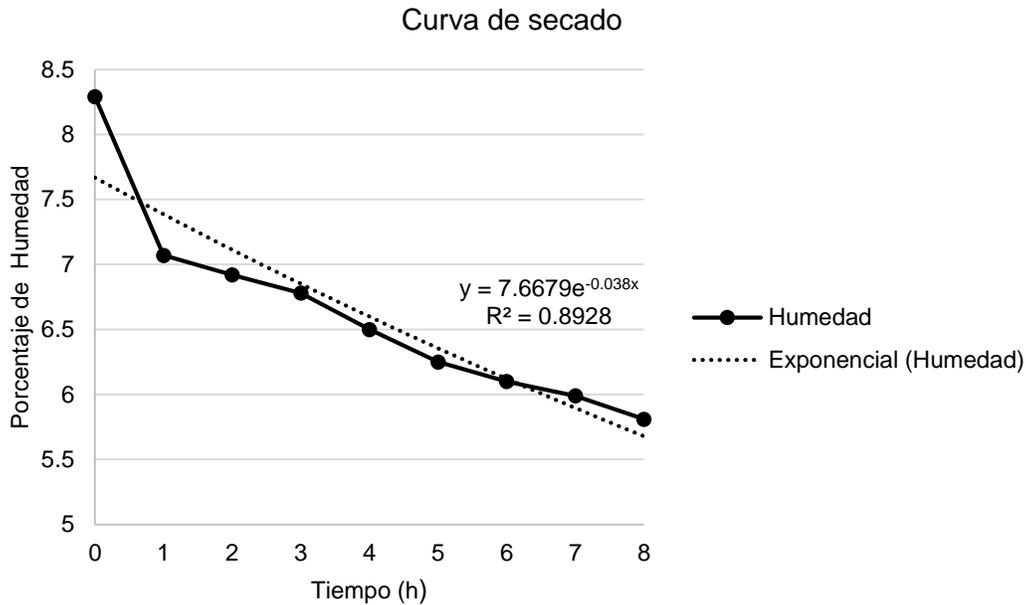
Fuente: Minitab 2018.

Al hacer un análisis de línea de tendencia en Excel 2016, los datos se ajustan a una función exponencial como se muestra en la gráfica 4.20 (ver gráfica 4.20), con un coeficiente de correlación  $R^2$  altamente significativo (0.8928). Por lo tanto, se concluye que la calidad de ajuste del modelo de regresión es buena y se considera buen predictor. Se obtiene la función de una curva de decaimiento:  $y=7.6679e^{(-0.038x)}$ ; la cual para fines de la empresa se aplica de la siguiente manera:  $y=(\text{porcentaje de humedad inicial})e^{(-0.038(\text{tiempo}))}$ .

Tabla 4.18 Resultados de curva de secado.

Curva de secado	
Tiempo	Humedad
0	8.29
1	7.07
2	6.92
3	6.78
4	6.5
5	6.25
6	6.1
7	5.99
8	5.81

Fuente: elaboración propia con información de la empresa.



Gráfica 4.20 Curva de secado.

Fuente: Microsoft Excel 2016.

#### 4.7.3 PROCEDIMIENTOS ESTÁNDAR Y AYUDAS VISUALES

Se elabora un procedimiento para el manejo del almidón de maíz en la máquina mogul y en el cuarto de secado en el formato REG-AC-015 de anexo 8 (ver anexo 8), con la finalidad de estandarizar las operaciones y evitar que se induzcan causas especiales de variación en el proceso. Así mismo se elabora un procedimiento acerca del manejo de la termobalanza en el formato REG-AC-016 del anexo 9 (ver anexo 9), con el propósito de asegurar la repetibilidad y reproducibilidad en las mediciones.

Se realiza una ayuda visual sobre el arreglo de tarimas en el formato REG-AC-017 del anexo 10 (ver anexo 10), para estandarizar el ingreso y la colocación de las tarimas en el interior del cuarto de secado. Se incluye también una ayuda visual sobre el muestreo de almidón en el formato REG-AC-018 del anexo 11 (ver anexo 11), con la finalidad de estandarizar la toma de muestras de almidón en los cajones.

Se genera una tabla de ayuda visual en el formato REG-AC-019 del anexo 12 (ver anexo 12), en la que se relaciona la humedad inicial con el tiempo de funcionamiento del cuarto de secado. De esta manera se puede localizar el tiempo necesario partiendo de una determinada humedad inicial, para obtener una humedad final deseada de acuerdo a los requerimientos del producto a fabricar.

## **RESULTADOS**

La variación Gage R&R total del sistema de medición equivale al 24.56% de la variación del estudio, mientras que la variación entre las partes equivale al 96.94%. La variación R&R total del sistema de medición es aceptable.

Los datos que se ajustan a una distribución normal son los correspondientes a la humedad final del almidón y a la variable de respuesta (humedad final – humedad inicial). La humedad inicial del almidón no se ajusta a una distribución normal debido a causas comunes de variación en el proceso.

Las variables independientes que influyen significativamente a la variable dependiente o de respuesta son la temperatura y la humedad del cuarto de secado, con un valor P de 0.000 y 0.002 respectivamente.

La combinación óptima del cuarto de secado que maximiza la diferencia de humedades de entrada y salida del almidón de maíz es 65°C de temperatura y 15% de humedad. Obteniendo una respuesta promedio de 3.737% de reducción de humedad durante 13 horas de funcionamiento.

La energía eléctrica consumida después de aplicar la mejora es de 143 kw, lo que implica un costo por corrida de \$149.721 equivalente a \$4491.63 mensuales. Se obtiene un ahorro de \$2418.57 mensuales con respecto al consumo anterior.

La capacidad potencial del proceso ( $C_p$ ) de 1.12 indica que el proceso es capaz de cumplir con especificaciones en cuanto a la humedad final del almidón. En el corto plazo se estiman 5127 muestras de humedad por cada millón que estarán fuera de especificaciones.

La capacidad real del proceso ( $C_{pk}$ ) de 0.86 indica que la media del proceso en cuanto a la humedad final del almidón está alejada del centro de especificaciones.

La curva de secado tiene la siguiente ecuación de regresión:  $y=7.6679e^{(-0.038x)}$ ; la cual para fines de la empresa se aplica de la siguiente manera:  $y=(\text{porcentaje de humedad inicial})e^{(-0.038(\text{tiempo}))}$ .

Se realizaron 2 procedimientos y 3 ayudas visuales para el proceso de secado del almidón de maíz.

## **CONCLUSIONES**

Gracias a la realización del presente proyecto en Industrias Vía Láctea S.A. de C.V., se logró maximizar el porcentaje de la diferencia de humedades de entrada y salida del almidón de maíz en el cuarto de secado. De esta manera el proceso de secado es capaz de cumplir con los requerimientos de la humedad final del almidón para la fabricación de los productos.

Se implementaron soluciones de mejora y se verificaron los resultados obtenidos mediante corridas de prueba.

Así mismo, se crearon medidas de control para mantener las mejoras logradas y evitar que se induzca variación por causas especiales en el proceso de secado del almidón de maíz.

## **RECOMENDACIONES**

Hacer uso de la función exponencial derivada de la curva de secado obtenida. De esta manera se optimiza el tiempo de secado de acuerdo a los requerimientos de humedad final para cada tipo de producto. Es necesario hacer un muestreo de todas las tarimas para obtener el porcentaje de humedad inicial del almidón, identificar el dato con la humedad más alta y con base en ello, ingresar los datos en la ecuación para calcular el tiempo necesario de secado. Adicionalmente, localizar el valor de la humedad inicial en la tabla del formato REG-AC-019 y localizar el tiempo necesario para obtener una humedad final que cumpla con los requerimientos del producto a fabricar.

Usar en todas las ocasiones el programa 3 del cuarto de secado (65°C de temperatura y 15% de humedad) para secar almidón de maíz.

Respetar el arreglo de tarimas en el formato REG-AC-017 del anexo 10 y la toma de muestras de almidón en formato REG-AC-018 del anexo 11, para evitar causas especiales de variación.

Intercambiar el almidón cada 6 meses por almidón nuevo para controlar la descomposición gradual de éste, ya que ocasionaría que el almidón se pueda empezar a pegar al producto debido a la alta recurrencia de las operaciones de secado y enfriado.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- AIAG. (1992). *Control estadístico de los procesos*. Michigan: Segunda edición.
- AIAG. (2002). *Análisis de sistemas de medición*. Michigan: Tercera edición.
- Gutiérrez Pulido, H. (2010). *Calidad Total y Productividad* (Tercera edición ed.). México: McGraw Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw-Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. México: McGraw-Hill.
- Juran, J., & Godfrey, A. (1998). *Juran's Quality Handbook* (Quinta ed.). Estados Unidos de America: McGraw Hill.
- Levin, R., & Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía* (Séptima ed.). México: Pearson.
- Pyzdek, T. (1976). *The Six Sigma Handbook*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena ed.). México: Pearson.

**ANEXOS**

Anexo 1. Registro de variables del proceso de secado.

	Registro de variables del proceso de secado.	Código: REG-AC-008
		Revisión: 1
		Página: 1 de 3

Variables del proceso de secado.							
Fecha.	Hora.	Temperatura Cuarto (°C).	%Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque (°C).	%Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente (°C).	Presión Caldera (psi).
18/02/2019	15	43.2	30.1	84	51	28.3	75
	16	47	30.2	84	51	27.7	100
	17	50.3	30.6	88	54	27.1	40
	18	53.5	31.3	90	57	26.4	90
	19	56	31.9	90	61	24.5	80
	20	56.1	32.1	80	61	23.3	100
	21	56.9	31.1	89	62	22.2	90
	22	57.4	30.6	90	65	21.9	80
20/02/2019	14	29.8	38.5	74	46	27.9	100
	15	35.8	33.9	73	47	28.5	98
	16	41	33.2	70	47	29.5	100
	17	45.9	33.5	80	48	28.2	100
	18	49.7	32.4	80	50	27.5	90
	19	53.2	32	85	50	27	90
	20	55	31.5	90	55	26.1	100
	21	56.1	31.2	90	56	25.5	100
22/02/2019	22	57.8	30.1	90	57	24.9	90
	16	29.9	30.9	60	59	23.7	90
	17	40.5	24.3	70	59	23.4	100
	18	43.3	24	75	59	23	100
	19	46.2	24.1	78	59	23	100
	20	49.5	23.5	80	59	22.3	100
	21	51.4	23.9	80	59	22.3	100
22	51.4	24	80	59	22.3	100	



Registro de variables del proceso de secado.

Código: REG-AC-008

Revisión: 1

Página:2 de 3

## Variables del proceso de secado.

Fecha.	Hora.	Temperatura Cuarto (°C).	%Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque (°C).	%Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente (°C).	Presión Caldera (psi).
25/02/2019	16	24.8	43	80	51	26.9	100
	17	39.9	33.2	80	46	30.1	100
	18	45.4	33	80	50	28	100
	19	46.9	32.7	80	56	26.3	100
	20	49.5	33.7	80	59	26.4	100
	21	51.4	32.3	80	62	24.7	100
	22	53.2	31.9	82	66	23.6	100
	23	53.8	31.3	82	66	23	100
	24	54.7	30.3	82	66	22	100
	1	54.8	29.9	80	65	22	100
	2	54.9	29	80	65	22	100
	3	55.3	27.8	80	64	21.2	100
4	54.7	26.8	80	64	20.8	100	
5	54.6	26.4	80	64	20.7	100	
6	54.3	25.2	80	64	20.5	100	
7	53.8	24.9	80	64	20.3	100	
8	52.3	24.4	70	63	21.4	90	
9	52.6	23.3	68	64	21.7	90	
10	52.8	22.9	70	64	23.1	65	
11	54.3	21.8	72	59	25.5	95	
12	56.4	20.8	82	59	26	40	
27/02/2019	22	25.6	32	100		26.2	100
	23	59.3	20.6	90		25.2	100
	24	59.8	20.3	90		24.6	100
	7	57.2	30.1	95		25	100
	8	58.4	29.3	92		24.5	100
	9	60.1	27.1	90		25.1	100
	10	61	26.8	92		26.3	100
11	60.9	25.8	92		27.7	100	



Registro de variables del proceso de secado.

Código: REG-AC-008

Revisión: 1

Página:3 de 3

Variables del proceso de secado.

Fecha.	Hora.	Temperatura Cuarto (°C).	%Humedad Cuarto.
28/02/2019	22	53.2	29.2
	23	52.9	28.4
	24	55.2	26.6
	1	57.3	25.4
	2	55.4	25.8
	3	55.3	24.3
	4	57.7	22.1
01/03/2019	5	56.4	22.3
	6	58.3	21
	7	59.4	20.3
	20	49.9	28.5
	21	53.2	29
	22	53.8	29.7
	23	53.7	29.3
	24	54.4	28.5
	1	54.9	27.9
	2	52.5	28.9
	3	54.3	25.8
	4	52.2	26.8
	5	55.1	23.8
6	55.7	23.4	
7	54	24.5	

Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

Anexo 2. Muestreo de almidón.

	Muestreo de almidón.	Código: REG-AC-009
		Revisión: 1
		Página: 1 de 3

Muestreo de almidón.				
Fecha.	Muestra.	%Humedad inicial.	%Humedad final.	Respuesta (%Humedad inicial-%Humedad final).
18/02/2019	1	9.13	5.74	3.39
	2	10.93	6.28	4.65
	3	8.78	6.08	2.7
	4	9.21	5.72	3.49
	5	9.47	5.69	3.78
	6	9.21	6.94	2.27
	7	8.63	6.47	2.16
	8	11.1	6.24	4.86
	9	9.38	7.29	2.09
	10	9.28	6.98	2.3
20/02/2019	1	9.62	5.45	4.17
	2	9.43	5.48	3.95
	3	8.82	5.89	2.93
	4	9.25	5.42	3.83
	5	7.64	5.7	1.94
	6	9.49	5.74	3.75
	7	8.38	6.06	2.32
	8	9.09	6.43	2.66
	9	9.51	6.35	3.16
22/02/2019	1	7	5.66	1.34
	2	6.57	5.68	0.89
	3	7.21	5.4	1.81
	4	8.02	5.8	2.22
	5	7.05	5.34	1.71
	6	7.12	5.29	1.83
	7	7.31	6.58	0.73
	8	7.54	5.98	1.56
	9	7.42	5.89	1.53
	10	6.89	6.2	0.69



## Muestreo de almidón.

Código: REG-AC-009

Revisión: 1

Página:2 de 3

Muestreo de almidón				
Fecha.	Muestra.	%Humedad inicial.	%Humedad final.	Respuesta (%Humedad inicial-%Humedad final).
25/02/2019	1	9.19	6.13	3.06
	2	8.63	5.48	3.15
	3	8.56	5.6	2.96
	4	8.79	5.68	3.11
	5	9.66	5.9	3.76
	6	8.37	5.74	2.63
	7	8.97	6.17	2.8
	8	8.93	6.72	2.21
	9	9.15	6.65	2.5
	10	8.38	6	2.38
27/02/2019	1	8.21	4.41	3.8
	2	8.37	4.27	4.1
	3	7.23	4.79	2.44
	4	9.57	4.8	4.77
	5	9.42	4.95	4.47
	6	8.25	4.99	3.26
	7	10.38	5.06	5.32
	8	10.39	5.98	4.41
	9	8.76	6.28	2.48
	10	9.3	6.21	3.09
28/02/2019	1	9.65	5.04	4.61
	2	9.1	4.96	4.14
	3	8.64	5.24	3.4
	4	8.25	5.57	2.68
	5	7.63	5.75	1.88
	6	9.24	5.93	3.31
	7	9.09	6.46	2.63
	8	8.82	6.83	1.99
	9	8.96	6.46	2.5
	10	8.9	6.58	2.32



Muestreo de almidón.

Código: REG-AC-009

Revisión: 1

Página:3 de 3

Muestreo de almidón				
Fecha.	Muestra.	%Humedad inicial.	%Humedad final.	Respuesta (%Humedad inicial-%Humedad final).
01/03/2019	1	8.54	6.59	1.95
	2	8.44	6.57	1.87
	3	8.48	6.3	2.18
	4	9.17	6.49	2.68
	5	8.77	6.55	2.22
	6	8.1	7.14	0.96
	7	7.91	5.41	2.5
	8	8.26	6.52	1.74
	9	7.82	7.06	0.76
	10	7.92	7.08	0.84

Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

Anexo 3. Resumen de datos para análisis.

	Resumen de datos para análisis.	Código: REG-AC-010
		Revisión: 1
		Página: 1 de 2

Resumen de datos.				
Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
43.2	30.1	9.13	5.74	3.39
47	30.2	10.93	6.28	4.65
50.3	30.6	8.78	6.08	2.7
53.5	31.3	9.21	5.72	3.49
56	31.9	9.47	5.69	3.78
56.1	32.1	9.21	6.94	2.27
56.9	31.1	8.63	6.47	2.16
57.4	30.6	11.1	6.24	4.86
29.8	38.5	9.62	5.45	4.17
35.8	33.9	9.43	5.48	3.95
41	33.2	8.82	5.89	2.93
45.9	33.5	9.25	5.42	3.83
49.7	32.4	7.64	5.7	1.94
53.2	32	9.49	5.74	3.75
55	31.5	8.38	6.06	2.32
56.1	31.2	9.09	6.43	2.66
57.8	30.1	9.51	6.35	3.16
29.9	30.9	7	5.66	1.34
40.5	24.3	6.57	5.68	0.89
43.3	24	7.21	5.4	1.81
46.2	24.1	8.02	5.8	2.22
49.5	23.5	7.05	5.34	1.71
51.4	23.9	7.12	5.29	1.83
51.4	24	7.31	6.58	0.73
24.8	43	9.19	6.13	3.06
39.9	33.2	8.63	5.48	3.15
45.4	33	8.56	5.6	2.96
46.9	32.7	8.79	5.68	3.11
49.5	33.7	9.66	5.9	3.76
51.4	32.3	8.37	5.74	2.63



## Resumen de datos para análisis.

Código: REG-AC-010

Revisión: 1

Página:2 de 2

## Resumen de datos.

Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
53.2	31.9	8.97	6.17	2.8
53.8	31.3	8.93	6.72	2.21
54.7	30.3	9.15	6.65	2.5
54.8	29.9	8.38	6	2.38
53.2	29.2	8.21	4.41	3.8
52.9	28.4	8.37	4.27	4.1
55.2	26.6	7.23	4.79	2.44
57.3	25.4	9.57	4.8	4.77
55.4	25.8	9.42	4.95	4.47
55.3	24.3	8.25	4.99	3.26
57.7	22.1	10.38	5.06	5.32
56.4	22.3	10.39	5.98	4.41
58.3	21	8.76	6.28	2.48
59.4	20.3	9.3	6.21	3.09
49.9	28.5	9.65	5.04	4.61
53.2	29	9.1	4.96	4.14
53.8	29.7	8.64	5.24	3.4
53.7	29.3	8.25	5.57	2.68
54.4	28.5	7.63	5.75	1.88
54.9	27.9	9.24	5.93	3.31
52.5	28.9	9.09	6.46	2.63
54.3	25.8	8.82	6.83	1.99
52.2	26.8	8.96	6.46	2.5
55.1	23.8	8.9	6.58	2.32

Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

Anexo 4. Variables del proceso de secado durante la corrida experimental.

	Variables del proceso de secado durante la corrida experimental	Código: REG-AC-011
		Revisión: 1
		Página: 1 de 3

Variables de proceso de secado.							
Programa de cuarto.	Hora.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.
65-20	22	27.1	47.4	80	53	24.7	100
	23	47.4	24.5	80	54	23.1	95
	24	50.3	24.5	80	53	23.1	100
	1	53.6	24.2	85	53	22.7	95
	2	56.3	23.2	90	55	22.6	95
	3	59	22.2	90	57	22.4	90
	4	61.2	20.7	95	58	22.2	90
	5	62.4	19.8	95	57	23	90
	6	63.3	19	90	57	21.5	100
65-15	7	63.4	18.6	90	57	21	100
	21	51.9	33.2	90	50	26.1	80
	22	53.4	32.9	85	51	21.1	100
	23	55.8	31.7	85	51	20.8	100
	24	58.4	29.5	85	51	20.2	100
	1	60.3	28.8	90	50	20.3	90
	2	61.6	26.3	90	48	20.3	90
	3	62.1	24.1	90	48	20	100
	4	62.3	22.4	90	46	19.5	100
60-15	5	63.2	21.3	90	48	19.5	90
	6	63.8	20.1	90	50	19.6	90
	22	55.2	29.2	95	46	19.2	95
	23	57	26.9	90	48	18.3	90
	24	57.5	25.9	90	48	18.7	100
	1	57.9	24.8	91	48	18.6	95
	2	58.5	23.7	91	49	18.5	95
	3	58.9	22.5	90	49	18.1	100
	4	59.4	21.3	91	50	17.8	100
	5	59.7	20.4	92	51	17.3	96
	6	59.9	19.7	88	52	17.1	100
	7	60	19.4	88	53	17.1	100

	Variables del proceso de secado durante la corrida experimental	Código: REG-AC-011
		Revisión: 1
		Página: 2 de 3

Variables de proceso de secado.

Programa de cuarto.	Hora.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.
65-25	22	51.6	33.4	90	51	19.2	90
	23	52.6	32.1	90	51	18.8	100
	24	53.3	30.8	90	52	17.3	100
	1	54.3	29.4	90	53	16.5	100
	2	55.2	27.7	90	54	16.6	100
	3	55.7	26.6	90	49	16.8	100
	4	56.2	25.1	90	45	17.5	95
	5	57	23.8	90	45	17.5	95
	6	57.6	22.6	92	45	17.6	95
	7	57.8	22.6	92	45	16.9	100
60-20	16	26.6	33.2	80	37	28.9	100
	23	43.2	34.4	80	39	21.4	100
	24	45.3	31.7	85	37	20.8	90
	1	48.6	29.8	85	35	20.5	90
	2	50.5	29.2	85	35	20.1	90
	3	52.5	28.2	90	32	19.5	90
	4	54	27.5	90	32	19	90
	5	55.9	26.1	90	37	18.8	90
	6	57.6	24.8	90	40	18.7	100
	7	59.9	22.6	90	44	18.3	100
60-25	21	48.2	24.5	80	46	22.2	95
	22	50.8	25.2	85	48	22.2	95
	23	52.7	25	80	49	21.3	90
	24	54.4	24.5	90	49	20.7	90
	1	51.5	23.7	90	49	20.4	90
	2	58.3	22.9	90	50	20.3	90
	3	59.2	22.7	95	55	20.1	90
	4	60	22	95	53	19.9	95
	5	60.6	21.2	90	52	19.4	100
	6	61	20.4	95	52	19	95



VARIABLES DEL PROCESO DE SECADO DURANTE LA CORRIDA EXPERIMENTAL

Código: REG-AC-011

Revisión: 1

Página: 3 de 3

VARIABLES DE PROCESO DE SECADO.

Programa de cuarto.	Hora.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.
55-20	14	25.3	31.4	80	37	26	100
	15	45.7	21.4	80	38	25.9	100
	16	49.1	22.8	85	41	25.4	100
	17	52	24.4	80	44	25.1	100
	18	54.7	24.5	90	49	23.9	90
	19	55.9	24.7	80	49	23.7	90
	20	56.1	24.8	80	49	23.2	90
55-15	17	28.2	30.9	80	42	26.5	100
	18	42.8	20.2	90	31	35.1	100
	19	51.6	19.3	90	39	28.1	100
	20	55.2	18.8	90	43	30.8	100
	21	57.3	18.7	90	40	33.7	100
	22	56.1	19.5	90	34	29	90

Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

Anexo 5. Muestreo de almidón durante la corrida experimental.

	Muestreo de almidón durante la corrida experimental.	Código: REG-AC-012
		Revisión: 1
		Página: 1 de 3

Almidón				
Programa de cuarto.	Muestra.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
65-20	1	8.46	4.81	3.65
	2	7.33	4.99	2.34
	3	7.33	5.95	1.38
	4	8.27	6.67	1.6
	5	8.25	6.31	1.94
	6	8.73	6.16	2.57
	7	8.84	6.59	2.25
	8	8.88	6.01	2.87
	9	7.78	5.56	2.22
	10	7.56	5.75	1.81
65-15	1	9.98	4.8	5.18
	2	9.24	4.74	4.5
	3	8.27	5.08	3.19
	4	7.96	4.85	3.11
	5	10.09	5.35	4.74
	6	8.63	6.22	2.41
	7	9.34	4.66	4.68
	8	8.88	4.74	4.14
	9	8.12	5.96	2.16
	10	9.63	5.86	3.77
60-15	1	9.08	4.39	4.69
	2	8.88	5.3	3.58
	3	8.18	4.77	3.41
	4	8.47	4.01	4.46
	5	8.66	4.96	3.7
	6	8.83	5.83	3
	7	8.98	5.15	3.83
	8	9.6	5.33	4.27
	9	8.93	5.37	3.56
	10	7.21	5.41	1.8



Muestreo de almidón durante la corrida experimental.

Código: REG-AC-012

Revisión: 1

Página: 2 de 3

Almidón.				
Programa de cuarto.	Muestra.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
65-25	1	9.76	4.53	5.23
	2	9.63	4.36	5.27
	3	9.15	5.4	3.75
	4	9.37	3.67	5.7
	5	8.63	5.54	3.09
	6	8.12	4.57	3.55
	7	9.58	5.1	4.48
	8	8.77	4.89	3.88
	9	8.85	6.8	2.05
	10	8.87	5.65	3.22
60-20	1	8.18	4.52	3.66
	2	7.27	6.7	0.57
	3	7.78	4.68	3.1
	4	9.38	5.1	4.28
	5	8.09	6.24	1.85
	6	8.54	6.21	2.33
	7	9.5	4.97	4.53
	8	8.78	5.06	3.72
	9	7.16	5.62	1.54
	10	9.28	6.85	2.43
60-25	1	9.25	5.12	4.13
	2	8.1	5.86	2.24
	3	8.98	5.73	3.25
	4	7.28	6.39	0.89
	5	7.38	5.93	1.45
	6	7.46	5.94	1.52
	7	7.31	5.69	1.62
	8	7.69	6.31	1.38
	9	7.86	6.82	1.04
	10	7.81	6.85	0.96

Programa de cuarto.	Muestra.	Almidón		Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
		Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	
55-20	1	7.77	5.84	1.93
	2	8.9	6.26	2.64
	3	7.33	5.63	1.7
	4	8.94	6.13	2.81
	5	7.96	5.58	2.38
	6	7.72	6.01	1.71
	7	7.49	6.17	1.32
	8	8.26	5.56	2.7
	9	7.9	6.27	1.63
	10	8.33	6.38	1.95
55-15	1	7.85	5.8	2.05
	2	7.68	5.07	2.61
	3	7.89	5.13	2.76
	4	8.1	6.24	1.86
	5	7.78	7.23	0.55
	6	8.11	6.6	1.51
	7	8.42	6.88	1.54
	8	7.56	5.83	1.73
	9	7.81	6.81	1
	10	7.96	7.23	0.73
55-25	1	8.48	7.67	0.81
	2	8.9	7.48	1.42
	3	8.99	6.72	2.27
	4	9.35	6.42	2.93
	5	9.03	7.09	1.94
	6	9.04	7.45	1.59
	7	9.04	6.94	2.1
	8	9.78	7.26	2.52
	9	8.45	6.86	1.59
	10	8.92	7.19	1.73

Anexo 6. Corrida de experimentos.

	Corrida de experimentos.	Código: REG-AC-013
		Revisión: 1
		Página: 1 de 3

OrdenEst.	OrdenCorrida.	TipoPt.	Bloques.	Temperatura.	Humedad.	Respuesta.	Humedad final.
47	1	1	1	55	20	1.93	5.84
51	2	1	1	60	25	4.13	5.12
10	3	1	1	55	15	2.05	5.8
74	4	1	1	55	20	2.64	6.26
59	5	1	1	60	20	3.66	4.52
28	6	1	1	55	15	2.61	5.07
69	7	1	1	60	25	2.24	5.86
76	8	1	1	60	15	4.69	4.39
31	9	1	1	60	15	3.58	5.3
89	10	1	1	65	20	3.65	4.81
61	11	1	1	65	15	5.18	4.8
60	12	1	1	60	25	3.25	5.73
18	13	1	1	65	25	5.23	4.53
26	14	1	1	65	20	2.34	4.99
56	15	1	1	55	20	1.7	5.63
37	16	1	1	55	15	2.76	5.13
90	17	1	1	65	25	5.27	4.36
29	18	1	1	55	20	2.81	6.13
9	19	1	1	65	25	3.75	5.4
71	20	1	1	65	20	1.38	5.95
73	21	1	1	55	15	1.86	6.24
2	22	1	1	55	20	2.38	5.58
5	23	1	1	60	20	0.57	6.7
33	24	1	1	60	25	0.89	6.39
48	25	1	1	55	25	0.81	7.67
24	26	1	1	60	25	1.45	5.93
53	27	1	1	65	20	1.6	6.67
22	28	1	1	60	15	3.41	4.77
84	29	1	1	55	25	1.42	7.48
68	30	1	1	60	20	3.1	4.68
12	31	1	1	55	25	2.27	6.72
21	32	1	1	55	25	2.93	6.42
34	33	1	1	65	15	4.5	4.74
38	34	1	1	55	20	1.71	6.01

	Corrida de experimentos	Código: REG-AC-013
		Revisión: 1
		Página: 2 de 3

OrdenEst.	OrdenCorrida.	TipoPt.	Bloques.	Temperatura.	Humedad.	Respuesta.	Humedad final.
20	35	1	1	55	20	1.32	6.17
54	36	1	1	65	25	5.7	3.67
81	37	1	1	65	25	3.09	5.54
86	38	1	1	60	20	4.28	5.1
40	39	1	1	60	15	4.46	4.01
70	40	1	1	65	15	3.19	5.08
87	41	1	1	60	25	1.52	5.94
72	42	1	1	65	25	3.55	4.57
15	43	1	1	60	25	1.62	5.69
55	44	1	1	55	15	0.55	7.23
78	45	1	1	60	25	1.38	6.31
46	46	1	1	55	15	1.51	6.6
7	47	1	1	65	15	3.11	4.85
83	48	1	1	55	20	2.7	5.56
44	49	1	1	65	20	1.94	6.31
4	50	1	1	60	15	3.7	4.96
11	51	1	1	55	20	1.63	6.27
39	52	1	1	55	25	1.94	7.09
13	53	1	1	60	15	3	5.83
36	54	1	1	65	25	4.48	5.1
14	55	1	1	60	20	1.85	6.24
57	56	1	1	55	25	1.59	7.45
1	57	1	1	55	15	1.54	6.88
45	58	1	1	65	25	3.88	4.89
23	59	1	1	60	20	2.33	6.21
88	60	1	1	65	15	4.74	5.35
27	61	1	1	65	25	2.05	6.8
66	62	1	1	55	25	2.1	6.94
43	63	1	1	65	15	2.41	6.22
67	64	1	1	60	15	3.83	5.15
6	65	1	1	60	25	1.04	6.82
85	66	1	1	60	15	4.27	5.33
75	67	1	1	55	25	2.52	7.26
49	68	1	1	60	15	3.56	5.37
3	69	1	1	55	25	1.59	6.86

	Corrida de experimentos.	Código: REG-AC-013
		Revisión: 1
		Página:3 de 3

OrdenEst.	OrdenCorrida.	TipoPt.	Bloques.	Temperatura.	Humedad.	Respuesta.	Humedad final.
41	70	1	1	60	20	4.53	4.97
77	71	1	1	60	20	3.72	5.06
25	72	1	1	65	15	4.68	4.66
52	73	1	1	65	15	4.14	4.74
35	74	1	1	65	20	2.57	6.16
80	75	1	1	65	20	2.25	6.59
42	76	1	1	60	25	0.96	6.85
64	77	1	1	55	15	1.73	5.83
17	78	1	1	65	20	2.87	6.01
50	79	1	1	60	20	1.54	5.62
19	80	1	1	55	15	1	6.81
79	81	1	1	65	15	4.97	5.96
82	82	1	1	55	15	0.73	7.23
16	83	1	1	65	15	3.77	5.86
63	84	1	1	65	25	3.22	5.65
30	85	1	1	55	25	1.73	7.19
65	86	1	1	55	20	1.95	6.38
32	87	1	1	60	20	2.43	6.85
62	88	1	1	65	20	2.22	5.56
58	89	1	1	60	15	1.8	5.41
8	90	1	1	65	20	1.81	5.75

Elaboró: Depto. de Control de Calidad	Autorizó: Supervisor de Calidad
---------------------------------------	---------------------------------

Anexo 7. Corridas de prueba.

	Corridas prueba	Código: REG-AC-014
		Revisión: 1
		Página: 1 de 2

No. Corrida.	Temperatura Cuarto.	Humedad Cuarto.	Temperatura Tanque.	Humedad Ambiente.	Temperatura ambiente.	Presión Caldera.	Muestra.	Humedad inicial de almidón.	Humedad final de almidón.	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final).
Corrida prueba 1	31.9	23	97	41	25.8	100	1	8.71	4.66	4.05
	51	14	97	42	25.5	100	2	7.59	4.03	3.56
	27.2	15	80	48	23.6	100	3	8.27	4.51	3.76
	57.7	14.8	80	47	22.6	100	4	8.3	4.49	3.81
	59.3	14.4	85	47	22.1	100	5	8.47	4.89	3.58
	60.8	14	90	45	21.8	90	6	8.72	5.21	3.51
	62.6	13.5	90	46	21.2	90	7	8.8	5.26	3.54
	64.6	13	90	46	20.7	100	8	7.61	4.17	3.44
	65.5	12.5	90	47	20.1	100	9	8.87	5.2	3.67
	63.4	12.9	95	46	19.9	100	10	9.07	5.33	3.74
Corrida prueba 2	22.7	19	80	34	23.4	100	1	7.77	4	3.77
	44.1	14	80	30	26.5	80	2	8.34	4.3	4.04
	52.4	14.6	83	33	29.1	100	3	8.41	4.68	3.73
	55.1	15.5	79	29	29.9	100	4	8.49	4.81	3.68
	56.6	15.3	84	28	29.7	100	5	8.21	4.36	3.85
	58.7	16	85	30	26.9	100	6	7.35	3.64	3.71
	59.3	15.6	85	30	25.8	100	7	8.29	4.43	3.86
	59.6	15.4	80	30	25.7	90	8	8.21	4.98	3.23
	60	15.2	85	30	25.1	100	9	8.8	5	3.8
								10	9.2	5.58
Corrida prueba 3	27.5	29.2	80	34	28.2	100	1	7.93	3.96	3.97
	47.7	18.7	84	31	29.6	100	2	7.41	4.2	3.21
	51.3	18.6	83	31	30.3	100	3	7.61	4.14	3.47
	56.3	19.3	86	34	30.7	100	4	8.42	4.59	3.83
	57.5	19.3	90	33	30.6	100	5	7.97	4.67	3.3
	60.4	19.1	90	32	30.4	100	6	8.78	4.21	4.57
	62.8	18.7	92	35	29	100	7	9.12	5.42	3.7
	63.2	18.7	90	36	28.9	100	8	7.92	4.16	3.76
	63.8	17.6	92	38	26.1	90	9	8.25	4.45	3.8
								10	8.55	4.95



Corridas prueba

Código: REG-AC-014

Revisión: 1

Página: 2 de 2

No. Corrida	Temperatura Cuarto	Humedad Cuarto	Temperatura Tanque	Humedad Ambiente	Temperatura ambiente	Presión Caldera	Muestra	Humedad inicial de almidón	Humedad final de almidón	Respuesta (Humedad inicial-Humedad final)
Corrida prueba 4	27.6	16.8	80	28	24.2	100	1	8.23	4.7	3.53
	46.8	12.4	80	27.4	26	40	2	8.61	4.52	4.09
	50.4	13.3	80	28	26	100	3	8.4	4.8	3.6
	54.5	13.5	82	25	26	100	4	8.11	4.39	3.72
	55.6	13.8	84	23	27.7	100	5	8.21	4.28	3.93
	53.5	16.8	84	24	26.9	100	6	8.27	4.6	3.67
	59	14.7	86	27	25.6	100	7	9.2	5.61	3.59
	59.8	14.5	86	28	24.2	100	8	8.4	4.62	3.78
	60	15	86	26	22.5	100	9	8.57	5.05	3.52
	61.8	14.1	94	26	22.3	100	10	9.08	5.01	4.07

Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

## Anexo 8. Procedimiento de manejo de almidón.

	Manejo de almidón en mogul y cuarto de secado.	Código: REG-AC-015
		Revisión: 1
		Página: 1 de 1

### Procedimiento:

1. Suministrar almidón a la máquina para poder operar.  
Nota: Se puede ingresar por medio de los cajones o vaciar costales directo al colector.
2. Ingresar cajones a la máquina en el alimentador.
3. Colocar almidón en los cajones hasta cubrir toda la superficie
4. Imprimir la figura de gota de 6.6 g en los cajones.
5. Retirar los cajones y acomodarlos en la tarima. Apilarlos a una altura máxima de 39 cajones.
6. Ingresar cajones al cuarto de secado una vez completa la tarima, manteniendo la compuerta del cuarto cerrada.
7. Ingresar las tarimas hasta completar el llenado del cuarto.
8. Realizar la toma de muestras del almidón de las diferentes tarimas, de uno de los cajones ubicados en la parte inferior e identificarlos.  
Nota: hacer el análisis de porcentaje de humedad de entrada.
9. Verificar las condiciones óptimas de los servicios:  
Nota: presión de la caldera (100 psi), temperatura del tanque de agua ( $\geq 80$  °C).
10. Elegir el programa preestablecido de temperatura y humedad del cuarto (programa 3).
11. Encender el cuarto.
12. Parar el cuarto una vez alcanzado el tiempo requerido para obtener la humedad final deseada, de acuerdo con la matriz de secado del formato REG-AC-019.
13. Realizar la toma de muestras de los cajones identificados en las diferentes tarimas  
Nota: hacer el análisis de porcentaje de humedad de salida del almidón.
14. Utilizar los cajones una vez aprobados los resultados de humedad final del almidón.

Elaboró: Depto. de Control de Calidad	Autorizó: Supervisor de Calidad
---------------------------------------	---------------------------------

## Anexo 9. Procedimiento de uso de la termo-balanza.

	Uso de la termo-balanza.	Código: REG-AC-016
		Revisión: 1
		Página: 1 de 1

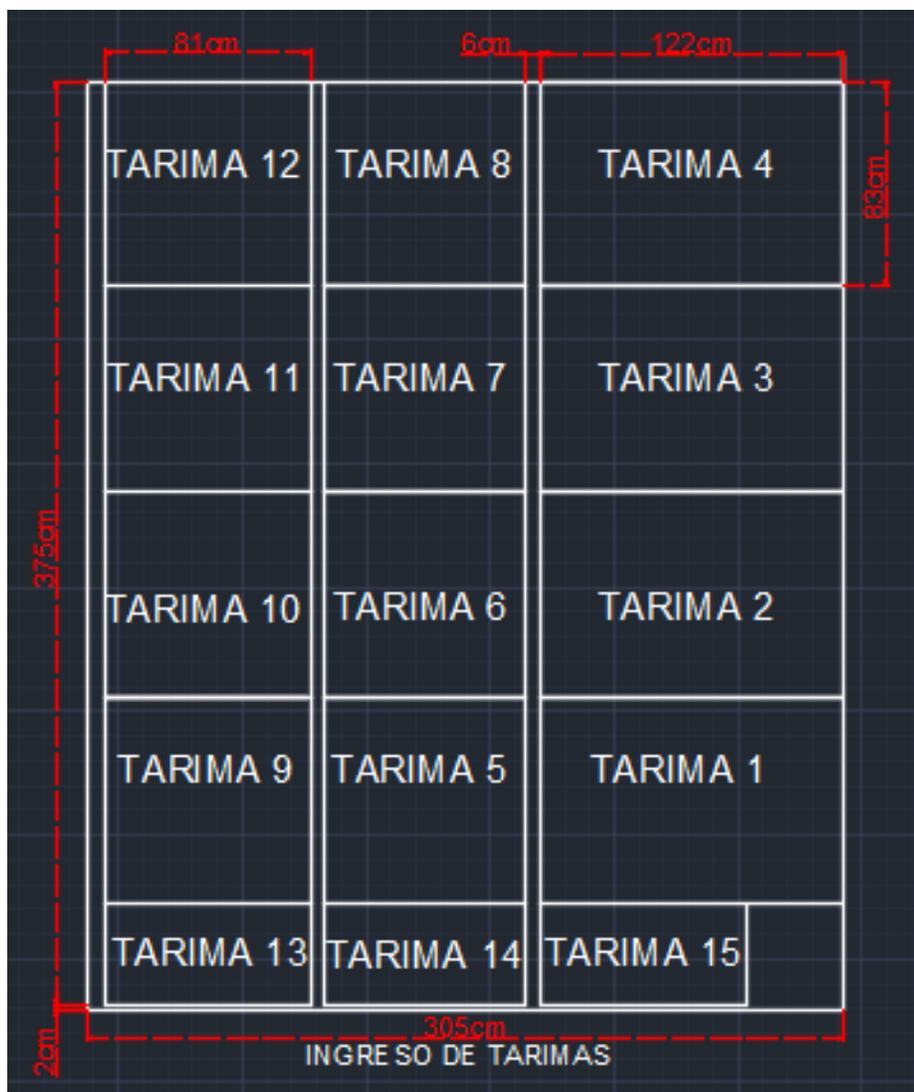
Antes del secado de la muestra, debe efectuarse la preparación de muestras.

- Preparación de muestras:
  1. Seleccionar la muestra.
  2. Asegurar la homogeneidad de la muestra mezclando o agitando.
  3. Preparar siempre solo una muestra para la medición, tan rápido como sea posible. De este modo se evita que intercambie humedad con el ambiente. Mantener el resto de las muestras en recipientes herméticos.
  4. Usar un platillo de muestra desechable.
  5. Distribuir homogéneamente la muestra en el platillo desechable (altura: 2 a 5 mm, cantidad: 10 g).
  6. Iniciar la medición si se ha cumplido la condición de pesaje.
  7. Finalizar la medición automáticamente.

Elaboró: Depto. de Control de Calidad	Autorizó: Supervisor de Calidad
---------------------------------------	---------------------------------

Anexo 10. Arreglo de tarimas en el cuarto de secado.

	Arreglo de tarimas en el cuarto de secado.	Código: REG-AC-017
		Revisión: 1
		Página: 1 de 1



- Capacidad máxima: 1240 cajones (con estiba de 40 cajones).
- Capacidad recomendada: 1209 cajones (con estiba de 39 cajones).

Elaboró: Depto. de Control de Calidad	Autorizó: Supervisor de Calidad
---------------------------------------	---------------------------------

Anexo 11. Toma de muestras de almidón.

	Toma de muestras de almidón.	Código: REG-AC-018
		Revisión: 1
		Página: 1 de 2

Tarimas del lado izquierdo



Tarimas frontales



Tarimas de en medio



Tarimas del lado derecho



Elaboró: Depto. de Control de Calidad

Autorizó: Supervisor de Calidad

Anexo 12. Matriz de secado del almidón de maíz.

	Matriz de secado del almidón de maíz.	Código: REG-AC-019
		Revisión: 1
		Página: 1 de 1

Matriz de secado de almidón de maíz.																									
Productos con azúcar												Productos cero azúcar													
Humedad inicial	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
11.0	10.6	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7
10.8	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.5	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6
10.6	10.2	10.0	9.8	9.6	9.5	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5
10.4	10.0	9.8	9.6	9.5	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3
10.2	9.8	9.6	9.5	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2
10.0	9.6	9.4	9.3	9.1	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1
9.8	9.4	9.3	9.1	8.9	8.7	8.6	8.4	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0
9.6	9.2	9.1	8.9	8.7	8.6	8.4	8.2	8.1	7.9	7.8	7.6	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9
9.4	9.0	8.9	8.7	8.5	8.4	8.2	8.1	7.9	7.8	7.6	7.5	7.3	7.2	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.8	5.7
9.2	8.9	8.7	8.5	8.4	8.2	8.1	7.9	7.8	7.6	7.5	7.3	7.2	7.1	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6
9.0	8.7	8.5	8.3	8.2	8.0	7.9	7.7	7.6	7.4	7.3	7.2	7.0	6.9	6.8	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5
8.8	8.5	8.3	8.2	8.0	7.9	7.7	7.6	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4
8.6	8.3	8.1	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.3	5.2
8.4	8.1	7.9	7.8	7.6	7.5	7.4	7.2	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1
8.2	7.9	7.7	7.6	7.5	7.3	7.2	7.0	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0
8.0	7.7	7.6	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9
7.8	7.5	7.4	7.2	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.9	4.8
7.6	7.3	7.2	7.0	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6
7.4	7.1	7.0	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5
7.2	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4
7.0	6.7	6.6	6.5	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.3
6.8	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1
6.6	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.3	4.2	4.1	4.0
6.4	6.2	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.1	4.0	3.9
6.2	6.0	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.2	4.1	4.0	3.9	3.9	3.8
6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.3	4.2	4.1	4.0	4.0	3.9	3.8	3.7	3.7
5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	4.0	3.9	3.8	3.7	3.7	3.6	3.5

Elaboró: Depto. de Control de Calidad	Autorizó: Supervisor de Calidad
---------------------------------------	---------------------------------