

**POSGRADO EN MECATRÓNICA**  
**CONTROL DE TEMPERATURA EN LA  
DESTILACIÓN DE UN AZEÓTROPO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
MECATRÓNICA**

**P R E S E N T A:**

**JUAN OLGUIN CAMACHO**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. DONAJI JIMÉNEZ ISLAS**

**Abril 2021**



---

---



**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE HUICHAPAN**



*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de Huichapan Hidalgo siendo las **10:00** horas del día **14** del mes de **enero** del **2021** se reunieron los miembros del Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica para examinar y valorar la tesis titulada:

Presentada por el alumno:

<b>Olguín</b>	<b>Camacho</b>	<b>Juan</b>
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con número de Matrícula: **M 0 5 0 2 1 0 4 5**

Aspirante al Grado de:

**Maestro en Ingeniería Mecatrónica**

Después de intercambiar opiniones, con los miembros del Consejo de Posgrado y Comité Tutorial manifestaron

**APROBAR LA TESIS**

en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes en el Tecnológico Nacional de México

Director de Tesis

---

Dr. Donáji Jiménez Islas

Revisor A

---

MGPA. Sergio Quintanar García

Revisor B

---

M en C. Luis Díaz Gómez



**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE HUICHAPAN**



**SOLICITUD DE CELEBRACIÓN DE EXAMEN  
DE GRADO Y DESIGNACIÓN DE JURADO**

Huichapan, Hgo., 14 de enero de 2021

**MTRO. ALFREDO PUENTE GARNICA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO ITESHU  
PRESENTE**

Por este conducto, solicitamos se designe **JURADO DE EXAMEN** y se avale la celebración del mismo, toda vez que la tesis "**Control de temperatura para el proceso de destilación de un azeotropo**" ha sido aprobado por la Comisión Revisora de Tesis del Programa del **Maestría en Ingeniería Mecatrónica (MPIMC-2011-33)**, y se han satisfecho todos los requisitos académicos mencionados en las disposiciones reglamentarias vigentes en el Tecnológico Nacional de México

Proponemos que el jurado quede integrado por los siguientes profesores:

Presidente: **Dr. Donaji Jiménez Islas**

Secretario: **MGPA. Sergio Quintanar García**

Primer Vocal: **M. en C. Luis Díaz Gómez**

**ATENTAMENTE**

Alumno

Director de Tesis

  
Ing. Juan Olguín Camacho

  
Dr. Donaji Jiménez Islas

**VISTO BUENO**

Presidente del Consejo de Posgrado

Subdirector de Investigación y Posgrado

  
C. Dr. Benigno Muñoz Barrón

  
C. Dr. Miguel Ángel Espíndola Lugo



**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE HUICHAPAN**



Huichapan, Hgo., 14 de enero de 2021 .

**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS**

**C. Ing. Juan Olguín Camacho**

**P r e s e n t e**

Por medio del presente nos dirigimos a Usted para informarle que su Trabajo de Tesis titulado:

**Control de temperatura para el proceso de destilación de un azeotropo**

El cual, fue presentado a nuestra consideración, ha sido aprobado para que se lleve a cabo la impresión definitiva del mismo.

Al cumplir con este último requisito, usted será considerado candidato a obtener el Título de Maestro en:

**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**Emiten su voto aprobatorio**

**Director de Tesis**

\_\_\_\_\_  
**Dr. Donaji Jiménez Islas**

**Revisor A**

\_\_\_\_\_  
**MGPA. Sergio Quintanar García**

**Revisor B**

\_\_\_\_\_  
**M. en C. Luis Díaz Gómez**

**Visto. Bueno.**

**Subdirector de Investigación y  
Posgrado**

\_\_\_\_\_  
**C. Dr. Miguel Ángel Espíndola Lugo**

**Presidente del Consejo de  
Posgrado**

\_\_\_\_\_  
**C. Dr. Berónimo Muñoz Barrón**

**Subdirector Académico**

\_\_\_\_\_  
**Mtro. Alfredo Puente Garnica**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE HUICHAPAN**



### ***CARTA CESIÓN DE DERECHOS***

En la Ciudad de el Saucillo, Huichapan, Hidalgo, el día **27** del mes **Abril** del año **2021**, el (la) que suscribe **Juan Olguin Camacho** alumno (a) del Programa de **Maestría en Ingeniería Mecatrónica** con número de matrícula **M05021045**, adscrito al Tecnológico Superior de Huichapan, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis, bajo la dirección de **Dr. Donaji Jiménez Islas** y cede los derechos del trabajo intitulado "**Control de Temperatura en la destilación de un Azeótropo**", al Instituto para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director. Este puede ser obtenido escribiendo a los siguientes correos electrónicos **jolguin@iteshu.edu.mx**; **subdeinvest@iteshu.edu.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente

Juan Olguin Camacho

# Resumen

El presente trabajo tuvo como finalidad determinar un control de temperatura para un proceso de destilación del azeótropo etanol-agua. El control influye directamente en la concentración final de la destilación prefiriendo respuestas sobreamortiguadas que dan lugar a curvas de temperatura suaves.

En el capítulo 1 se realizó una revisión de la importancia de la obtención del etanol y la necesidad de implementarlo como sustituto de la gasolina mostrando las ventajas de su uso. Se revisó la implementación de sistemas de control en los procesos de destilación observando el uso generalizado de controladores PI y predictores. Se analizaron las condiciones actuales para el uso de los biocombustibles a nivel nacional e internacional, observando las políticas aplicables, así como las regulaciones existentes. Del análisis de costos de producción del etanol se determinó que la destilación impacta en los gastos de proceso mostrándose como el sub-proceso más costoso. Finalmente se realizó la vigilancia tecnológica de los sistemas de destilación concluyendo que esta se realiza a altas presiones y temperaturas en las que se busca reducir el coste energético.

Para el capítulo 2 se describió la metodología a seguir en el presente trabajo dividida en 5 partes: i) Modelado 3D, se determinaron las configuraciones de un evaporador y un destilador, integrando así la planta de estudio; ii) fabricación, se describen los pormenores de la fabricación de la planta previamente modelada generada la caldera y un destilador de platos; iii) Instrumentación, se describe el tipo de sensores utilizados así como las características de muestreo aplicadas; iv) Modelado, a partir de los datos muestreados en una prueba se expone la identificación de la planta comparando 3 modelos, se explica la obtención de la curva de temperatura de evaporación y fracción molar mediante el software ChemSep. Posteriormente se desarrolla el procesamiento de la información en el software Matlab donde se describe la obtención de una ecuación que relaciona la densidad y la fracción molar de etanol así como el cálculo del tiempo de calentamiento de la mezcla, también se explica el ajuste de curva que relaciona la temperatura de evaporación con la concentración de etanol; v) Controlador, se detalló el análisis de un control PI y un predictor Smith por medio de la simulación en Matlab partiendo de la respuesta escalón unitario, finalmente se describe la simulación de referencias escalón diferentes al unitario y una entrada rampa.

Por otra parte en el capítulo 3 se reportan los resultados obtenidos de la metodología planteada en el párrafo anterior, iniciando por la fabricación de la planta mostrando las partes fabricadas y su ensamble, seguido del análisis de esta donde se reportan las funciones de transferencia de los 3 modelos obtenidos y su grado de ajuste determinado la mejor aproximación, posteriormente se analiza el perfil binario obtenido en ChemSep y se estima el tiempo de calentamiento de la mezcla a través de una gráfica utilizando la ecuación de densidad vs fracción molar obtenida a partir de un polinomio de segundo grado, después

---

de lo cual se obtiene una función acotada que relaciona la temperatura con la contracción de la que se determina valor de la temperatura de separación; seguidamente se reporta el resultado de las simulaciones del control confrontando la respuesta del controlador PI y el predictor Smith ante las diferentes entradas, en último lugar se comparan los resultados obtenidos con los de dos autores que realizaron trabajos similares.

Finalmente, en el capítulo 4 se reportan las conclusiones de presente tesis en el siguiente orden: i) planta, ii) instrumentación iii) análisis de la planta, iv) controlador y v) comparación, puntualizando las características obtenidas en cada apartado y los aportes principales. Por último, se marcan las perspectivas de este trabajo.



# Abstract

The purpose of this work was to determine a temperature control for a process of distillation of the ethanol-water azeotropic. The control directly influences the final concentration of distillation by preferring over-damped responses that result in mild temperature curves.

In chapter 1 reviewed the importance of obtaining ethanol and the need to implement it as a substitute for gasoline showing the benefits of its use. The implementation of control systems in distillation processes was revised observing the widespread use of PI controllers and predictors. Current conditions for the use of biofuels at national and international level were analyzed, in compliance with applicable policies as well as existing regulations. The analysis of ethanol production costs found that distillation impacts process costs by showing itself as the most expensive sub-process. Finally, technological monitoring of distillation systems was carried out concluding that distillation systems are carried out at high pressures and temperatures in which the energy cost is sought.

In chapter 2 describes the methodology to be followed in this work divided into 5 parts: i) 3D modeling, the configurations of an evaporator and distiller were determined, thus integrating the study plant; ii) manufacture describes the details of the manufacture of the previously modeled plant generated by the boiler and a distiller, iii) Instrumentation describes the type of sensors used as well as the sampling characteristics applied, iv) Modeling, from the data sampled in a test exposes the identification of the plant comparing 3 models, explains the obtaining of the evaporation temperature curve and molar fraction using ChemSep software. Information is then developed in Matlab software describing obtaining an equation that relates density and the molar fraction of ethanol as well as the calculation of the heating time of the mixture, also explains the curve adjustment that relates the evaporation temperature to the ethanol's concentration; v) Controller, the analysis of a PI control and a Smith predictor was detailed through simulation in Matlab based on unit step response. Finally, the simulation of step references other than the unitary one and a ramp input are described.

On the other hand, Chapter 3 reports the results obtained from the methodology described in the previous paragraph, starting with the manufacturing of the plant showing the manufactured parts and their assembly, followed by the analysis of this where the transfer functions of the 3 models obtained and their degree of adjustment determined the best approximation are reported. Afterwards, the binary profile obtained in ChemSep is analyzed and the heating time of the mixture is estimated through a graph using the equation of density vs molar fraction obtained from a second degree polynomial, after which a bounded function that relates the temperature with the contraction of which the value of the separation temperature is deter-

---

mined; Next, the results of the control simulations are reported, comparing the response of the PI controller and the Smith predictor to the different inputs, and finally, the results obtained are compared with those of two authors who carried out similar works.

Finally, Chapter 4 reports the conclusions of this thesis in the following order: i) plant, ii) instrumentation, iii) plant analysis, iv) controller and v) comparison, pointing out the characteristics obtained in each section and the main contributions. Lastly, the perspectives of this work are outlined.

# Agradecimientos

A mis queridos hijos por ser una fuente de inspiración y compromiso que fortaleció la realización del presente trabajo.

A mi madre por su abnegación y apoyo en el emprendimiento de mis proyectos de vida.

A mi padre por su consejo y legado.

A mis hermanos por su ejemplo y apoyo.

A mis compañeros y amigos Ana Lilia Pimienta Chávez e Ignacio Ventura Cruz por su acompañamiento y apoyo moral y profesional.

Al Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, por brindar un servicio de calidad, a los directivos y profesores de las diversas áreas del instituto que influyeron de forma positiva en el desarrollo de este trabajo y al personal que labora en el laboratorio de Ingeniería Mecatrónica por sus vocación de servicio.

Al Tecnológico Nacional de México por los apoyos prestados a este trabajo por medio del financiamiento del proyecto de investigación ligado a la presente tesis.

Al Dr. Donaji Jiménez Islas por su paciencia, guía y tutoría en el desarrollo de este trabajo y mi perfil profesional.

Al MGP. Sergio Quintanar García, por su apoyo como profesor, jefe y amigo fungiendo como un guía asertivo en mi desarrollo profesional y personal. Instruyéndome con su consejo y ejemplo destacando siempre su excelencia profesional y calidad humana.

Al Ing. Justo Juan Manuel Martínez Licon y la Mtra. María Angélica Bravo Cadena por darme la primera oportunidad para desarrollarme en el área académica como profesionista.

A la Mtra. Imelda Pérez Espinoza, por su apoyo con incentivos y becas como trabajador del ITESHU durante los estudios de maestría.

A mis queridos alumnos que se convirtieron en mis maestros en la realización de las actividades escolares de maestría, mostrándome que ellos son una fuente de conocimientos basados en la confianza y apoyo mutuo.



# Índice general

<b>1.</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	2
1.1.1. El etanol . . . . .	2
1.1.2. Control en los procesos de destilación . . . . .	3
1.1.3. Control de procesos de destilación de etanol . . . . .	5
1.2. Justificación . . . . .	6
1.2.1. Los combustibles fósiles . . . . .	6
1.2.2. Los bioenergéticos . . . . .	6
1.2.3. Políticas para los biocombustibles . . . . .	7
1.2.4. Regulaciones para el desarrollo de bioenergético . . . . .	9
1.2.5. Costos en la producción de etanol . . . . .	11
1.2.6. Vigilancia Tecnológica . . . . .	13
1.3. Nivel de Madurez Tecnológica . . . . .	13
1.4. Objetivo . . . . .	17
1.4.1. Objetivos particulares . . . . .	17
<b>2.</b>	<b>19</b>
2.1. Planteamiento . . . . .	19
2.2. Diseño CAD . . . . .	20
2.3. Análisis de la planta . . . . .	22
2.3.1. Identificación . . . . .	22
2.3.2. Análisis temperaturas de separación y concentraciones . . . . .	23
2.3.3. Ajuste de la curva de temperatura de evaporación . . . . .	28
2.4. Controlador . . . . .	29
2.4.1. Simulación de diversas entradas . . . . .	32
<b>3.</b>	<b>35</b>
3.1. Fabricación de la planta . . . . .	35

3.2. Análisis de la planta . . . . .	37
3.2.1. Identificación . . . . .	37
3.2.2. Perfil binario etanol-agua . . . . .	40
3.3. Control de temperatura . . . . .	46
3.3.1. Control PI vs predictor Smith . . . . .	46
3.3.2. Efecto del control de temperatura en la concentración . . . . .	52
3.4. Comparación . . . . .	53
3.5. Productos de la presente tesis . . . . .	56
<b>4.</b>	<b>59</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	59
4.2. Perspectivas . . . . .	60
<b>A. Planos de construcción</b>	<b>61</b>
<b>B. Lectura de temperatura</b>	<b>81</b>
<b>C. Carga de datos para identificación</b>	<b>85</b>
<b>D. Cálculo del tiempo de calentamiento</b>	<b>87</b>
<b>E. Cálculo de la densidad respecto a la fracción molar de etanol</b>	<b>89</b>
<b>F. Gráfica Txy</b>	<b>91</b>
<b>G. Simulación del controlador Smith</b>	<b>93</b>
<b>H. Simulación de la respuesta del sistema a diversas entradas</b>	<b>95</b>
<b>I. Relación control vs concentración</b>	<b>99</b>
<b>J. Artículo</b>	<b>103</b>
<b>K. Ponencias en congresos</b>	<b>105</b>
<b>L. Presentación de poster</b>	<b>107</b>
<b>M. Proyectos financiados</b>	<b>109</b>
<b>N. Proyectos sometidos</b>	<b>111</b>
<b>Referencias</b>	<b>112</b>

# Índice de figuras

1.1. Proceso general de la producción de bioetanol . . . . .	3
1.2. Distribución en porcentaje de los costos de producción de etanol en México, (Becerra-Pérez 2009, Horta-Noriega 2006) . . . . .	12
2.1. Diagrama las fases y procesos utilizados para el desarrollo presente trabajo . . . . .	19
2.2. Disposición física de la planta . . . . .	20
2.3. Conjunto de soporte del motor . . . . .	22
2.4. (a) Entrada de datos para identificación; (b) Identificación de procesos con tiempo muerto . . . . .	23
2.5. (Continúa en la siguiente página) . . . . .	24
2.5. (Continúa en la siguiente página) . . . . .	25
2.5. Interfaz del software ChemSep: (a) Ventana de componentes; (b) Ventana de operación; (c) Ventana de propiedades; (d) Ventana de análisis; (e) Ventana de diagrama de fases binarias; (f) Ventana de resultados . . . . .	26
2.6. Elementos de la interfaz curve fitting de Matlab . . . . .	29
2.7. Estructura del control PI con predictor Smith (Mathworks 2020) . . . . .	30
2.8. Lazo de control realimentado (Mathworks 2020) . . . . .	31
2.9. Configuración con predictor Smith . . . . .	32
3.1. (a) Casco y tapa del evaporador; (b) Cuerpo y cierre del destilador de platos; (c) Bancadas . . . . .	35
3.2. (a) Base del motor (fabricación: impresión 3D); (b) Postes fijos y móviles (fabricación: maquinado); (c) Prensable: motor-base-postes fijos ;(d) Prensable: motor-base-postes fijos- postes móviles . . . . .	36
3.3. (a) Conector de la propela; (b) Conector del motor; prensable: de los conectores de la propela y el motor; (c) Prensable: conjunto de soporte del motor, (d) Acoplamiento conjunto de soporte del motor-propela-recinto . . . . .	36
3.4. Gráfica de los datos muestreados en la prueba de identificación . . . . .	37
3.5. Resultados de la identificación por modelo de procesos . . . . .	38
3.6. Error porcentual de la estimación de la función de transferencia . . . . .	38
3.7. Resultado de la identificación por modelo de función de transferencia . . . . .	39
3.8. Gráfica de temperatura de evaporación y de rocío de la mezcla etanol-agua . . . . .	40
3.9. Curva de calentamiento de la mezcla etanol-agua . . . . .	40
3.10. Delimitación del cambio de fase en la curva de calentamiento de la mezcla etanol-agua . . . . .	41

3.11. Ajuste de curva de densidad vs fracción molar . . . . .	41
3.12. Cálculo de la densidad de la mezcla etanol-agua . . . . .	42
3.13. (Continúa en la siguiente página) . . . . .	44
3.13. Ajustes de la curva de temperatura de evaporación vs concentración: (a) Ajuste polinomial; (b) Ajuste gaussiano; (c) Ajuste racional . . . . .	45
3.14. Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con retardo . . . . .	46
3.15. Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control PI . . . . .	47
3.16. Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control del predictor Smith . . . . .	47
3.17. (Continúa en la siguiente página) . . . . .	49
3.17. Respuesta del controlador PI y el Predictor Smith ante dos escalones sucesivos no unitarios (a) Límites del estado estable; (b) Tiempos de asentamiento estimados y sobrepasos; (c) valor máximo del controlador (PI) . . . . .	50
3.18. Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control del predictor Smith . . . . .	51
3.19. (Continúa en la siguiente página) . . . . .	52
3.19. Respuesta del sistema y comportamiento de la concentración de etanol en la mezcla (a) Simulación a 100°C; (b) Simulación a 80°C; (c) Simulación a 78.38°C (temperatura de separación) . . . . .	53
3.20. Respuesta de la planta (a) Planta desarrollada en el presente trabajo (b) Planta desarrollada por Pérez-Núñez et al. (2018) . . . . .	54
3.21. Respuesta del controlador PI: (a) Desarrollada en el presente trabajo (b) Desarrollada por Pérez-Núñez et al. (2018) . . . . .	54
3.22. Continúa en la siguiente página . . . . .	55
3.22. Simulación de un sistema de destilación de ante a un escalón de 100°C (Fernández-Hernández 2013): (a) Comportamiento de la concentración molar del etanol a lo largo de la simulación; (b) Comportamiento de la temperatura de la planta a lo largo de la simulación . . . . .	56



# Índice de tablas

1.1. Comparación económica de los métodos de destilación . . . . .	4
1.2. Políticas para la mezcla de etanol en diversos países . . . . .	7
1.3. Especificaciones de calidad y características del bioetanol . . . . .	10
1.4. Costo de producción de etanol en México (Becerra-Pérez 2009) . . . . .	11
1.5. Extracto de la tabla de Guía del TRL (Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta 2019) . . . . .	14
1.6. Análisis del TRL Inicial . . . . .	16
2.1. Fracción molar vs densidad (Cerquera & Acosta 2016) . . . . .	28
3.1. Valores del proceso de identificación . . . . .	39
3.2. Resumen del ajuste de la curva temperatura de evaporación vs concentración . . . . .	43
3.3. Características de la respuesta de los diferentes sistemas a una referencia escalón unitario . . . . .	48
3.4. Respuesta de la implementación del controlador PI y el predictor Smith ante dos escalones no unitarios . . . . .	50
3.5. Respuesta de sistema a una entrada rampa . . . . .	51
3.6. Comparación de resultados con Pérez-Nuñez et al. (2018) . . . . .	55
3.7. Productos derivados de la presente tesis . . . . .	56
3.7. Productos derivados de la presente tesis . . . . .	57
3.7. Productos derivados de la presente tesis . . . . .	58



# Capítulo 1

En la actualidad, la reducción de emisiones de contaminantes a la atmósfera y gases de efecto invernadero (GEI) se ha convertido en una necesidad primaria, debido al deterioro del planeta que se ha presentado en las últimas décadas, lo que implica la toma de acciones que ayuden a mitigar el consumo desmedido de combustibles fósiles que presentan efectos adversos en el medio ambiente y que sin embargo, son la primera fuente de energía a nivel mundial, poniendo en riesgo la seguridad energética. Derivado de ello buena parte de los conflictos bélicos de las últimas décadas han sido a causa del acceso a los hidrocarburos, la regulación de su precio o temas relacionados con la explotación y manejo del petróleo.

De los problemas sociales, políticos y ecológicos ocasionados por los combustibles fósiles, en particular atendiendo a la problemática del cambio climático, los gobiernos han propuesto eliminar el uso de combustibles fósiles a finales del siglo XXI. Para ello las tecnologías renovables se muestran como la alternativa por excelencia, buscando con ello reemplazar en mayor medida los procesos convencionales en los que se utilizan combustibles por procesos alternativos en los cuales se haga uso de la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y la biomasa (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016).

De acuerdo con el reporte global realizado por REN21 (2019), del total de la energía utilizada a nivel mundial el 32 % es consumida por transporte y un componente del 3.3 % de esta son combustibles amigables con el medio ambiente; de estos únicamente el 3 % son biocombustibles. Por su parte, México requiere un gran trabajo en materia de energías renovables, puesto que de acuerdo al balance nacional de energía, el 62 % de la energía primaria depende del petróleo, condensados el 1 %, nuclear 1.6 %, gas natural 21.6 %, carbón 4.4 % y solo el 9.5 % es de energía renovable; y del total de la energía del país el 42.9 % está destinada al transporte. Aunado a esto la caída en la producción de petróleo ha detonado políticas que fomenten el uso de energías renovables hasta del 30 % respecto al consumo total en el país (SENER 2017, Camara de Diputados 2008).

La importancia de reducir el consumo de combustibles fósiles es evidente y el caso de la industria del transporte, es fundamental reducir las emisiones de GEI y obtener combustibles de fuentes renovables. Por ello, actualmente existe la necesidad de garantizar una producción sustentable en aspecto ambientales, económicos y sociales de los combustibles alternativos, de los cuales existen grandes avances en materia de bioetanol, boidiésel y bioturbosina.

El uso del etanol como sustituto de las gasolinas, o en combinación con estas tiene la finalidad de reducir las emisiones de contaminantes antes descritos, mejora la calidad de la combustión y reemplaza los aditivos nocivos para la salud de las per-

sonas, como el plomo y el metil terbutil éter (MTBE), que son un factor del incremento de personas afectadas por el cáncer. Sin embargo, la producción de etanol presenta problemas en la etapa de destilación debido a que este es soluble con el agua las relaciones de concentración en los procesos se ven limitados del 40 al 60 por ciento, en procesos convencionales. En este sentido, la alternativa para lograr una destilación con concentraciones superiores es el uso de procesos de alta presión, pero estos aumentan el costo de producción y complican las medidas de seguridad requeridas.

Se han ideado técnicas que ayuden a romper con la unión etanol-agua, lo cual se logra anexando un tercer elemento que funja como azeótropo para así lograr la separación entre el etanol y el agua. No obstante, aun cuando se ha logrado dicha separación, el tema imperante es lograr una destilación adecuado de la nueva combinación que forma el azeótropo, puesto que la diferencia de los puntos de evaporación entre el elemento tercer elemento y el etanol oscila entre 1 y 3 grados, lo que genera un área de estudio en donde el ahorro de energía en el proceso de destilación de esta mezcla y el desarrollo de estrategias para el control de la temperatura en gradientes menores a un grado son importantes.

## **1.1. Antecedentes**

### **1.1.1. El etanol**

El uso de los combustibles fósiles para el transporte tuvo sus inicios en el siglo XX cuando Henry Ford diseñó el modelo Ford T (1908-1927) el cual podía utilizar etanol; sin embargo, debido a los precios bajos y el suministro abundante de los combustibles fósiles se optó por el uso de las gasolinas (García-Bustamante & Masera-Cerutti 2016). No obstante, este hecho se ha invertido en las últimas décadas, puesto que la disponibilidad del petróleo se ha ido mermando, impactando sobre el precio de sus derivados, aunado a los efectos adversos causados por estos últimos, tomando nuevamente importancia el uso de los biocombustibles (García-Bustamante & Masera-Cerutti 2016, Das-Neves et al. 2007), que hacen referencia a todo aquel combustible alternativo derivado de material orgánico, como cultivos energéticos, residuos de cultivos o residuos de biomasa.

Dentro de los biocombustibles, el etanol ha tenido una producción que oscila entre los 12-26 millones de litros en todo el mundo. Donde los mayores productores son Estados Unidos de América y Brasil. La utilización del etanol de ha dado principalmente en mezclas con gasolinas, aportando mayor octanaje, además de ser un sustituto de oxigenantes como el MTBE que es cancerígeno y nocivo para el medio ambiente. Por otra parte, el rendimiento calorífico del etanol es menor que el de las gasolinas en un 30 %, lo que implica que el para que este sea un sustituto de la gasolina el equilibrio energético es de 1.4:1 (García-Bustamante & Masera-Cerutti 2016, Branco et al. 2018).

Otro beneficio del uso del etanol como combustible es mejorar el octanaje a 90 en motores, que es más alto que la gasolina estándar con un octanaje entre 83 y 90. Aunado a lo anterior se suma la presión de vapor más baja respecto a la gasolina (de 16KPa versus 71KPa de la gasolina estándar) que se traduce en menores emisiones evaporativas; la inflamabilidad en el aire del etanol también es menor (de 1.3-19 % v/v contra 2.5-19 % v/v respectivamente) lo que beneficia al rendimiento en el motor

y la prevención de incendios en vehículos (Das-Neves et al. 2007).

### 1.1.1.1. Proceso de producción del etanol

Tanto el etanol de primera generación como el de segunda generación poseen procesos de producción similares, difiriendo en el origen de la materia prima y el tratamiento inicial que tiene la materia prima, sin embargo, genéricamente el proceso es el mismo. En la Figura 1.1, se muestra el proceso global; inicialmente se realiza la preparación de la materia prima, que implica limpieza y preparación (en el caso de la segunda generación reducción de tamaño y algún tratamiento térmico y químico); la hidrólisis, para obtener azúcares fermentables (sacarificación); fermentación, donde las azúcares se convierten a etanol; y deshidratación, que se utiliza para separar y purificar el etanol obtenido previamente.



Figura 1.1: Proceso general de la producción de bioetanol

De las etapas de producción, la recuperación y deshidratación, proceso en el cual se obtiene el etanol para su uso, del paso anterior (fermentación), se obtiene una mezcla con una concentración del 5 al 12 % de etanol, por lo cual la destilación se realiza de forma segmentada, en donde en una primera fase se obtiene una concentración por encima del 20 %, y posteriormente se busca obtener en una columna de rectificación una concentración del 93 al 94 %, pero debido a un diferencial de temperatura del azeótropo, esta última destilación tiene un alto consumo energético, que representa del 60 al 80 % del coste de separación del etanol (Branco et al. 2018, Galbe et al. 2013). Por lo anterior se debe de implementar una etapa de deshidratación después de la destilación.

### 1.1.2. Control en los procesos de destilación

Debido a la importancia que ha tomado el uso de combustibles alternativos, se ha acentuado la necesidad de obtener una pureza mayor en estos, en el caso del etanol se requieren dos etapas de separación que exigen grandes cantidades de energía para alcanzar la pureza deseada de 95.63 % en peso de etanol. El primer paso es una destilación ordinaria denominada pre-concentración donde se llega a un concentrado del 92.4 al 94 % en peso; el segundo paso consiste en la deshidratación del etanol hasta concentraciones más altas, existiendo varias alternativas para ello: pervaporación, adsorción, destilación a presión oscilante, destilación extractiva (ED), destilación azeotrópica (AD), así como los métodos híbridos que combinan estas. Estos últimos son la opción por elección para los procesos de destilación, debido a que han mostrado robustez en producciones de

etanol a gran escala, aun cuando el costo energético es alto (Kiss & Suszwalak 2012).

La combinación de la ED y la AD, acarrea consigo las ventajas de ambas y se disminuyen las desventajas de la AD puesto que no hay un equilibrio liquido-liquido heterogéneo y no existen azeótropos adicionales, quedando así marcadas las temperaturas de separación entre el etanol, el agua y el elemento de arrastre; aunado a que los costos de inversión se encuentran en el punto intermedio en la implementación de estos tipo de destilación como lo reporta Lauzurique-Guerra et al. (2017) en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Comparación económica de los métodos de destilación

<b>Componentes</b>	<b>Tamices Moleculares</b>	<b>Pervaporación</b>	<b>Destilación Azeotrópica</b>
Valor Actual Neto (VAN)(\$)	23 594 637.3	8 216 112.6	12 374 017.4
Tasa Intermedia de Rendimiento (TIR)(%)	60.9	36.1	49,8
Plazo de recuperación del capital al descontado (PRC)(años)	1,6	2,6	2,0
Retorno sobre la inversión (RSI) (%)	8,1	52,8	72,6
Tasa de rendimiento actualizado (RVAN) (\$ / \$)	2,47	1,14	1,86

Con la finalidad de reducir los costes anuales de operación cobra relevancia la optimización de los procesos de destilación, que implican, por un lado, el uso sistemas de control que garanticen su operación en el rango establecido para el proceso donde la conversión del estado estacionario a un estado dinámico es fundamental al evaluar el efecto de las perturbaciones en este y por otro la implementación de energías alternativas para su operación (Gil et al. 2016, 2012).

En el caso de las columnas de destilación se han propuesto diversas estructuras de control, que dependen del diagrama de flujo de procesos y el tipo de reacción que se da en la columna, en donde el nivel de pureza implica la medición de su composición lo cual encarece la implementación, debido a ello se ha optado por trabajar con la información de la temperatura para con ello inferir la composición de los productos. Para ello, el sistema de destilación debe seguir los siguientes criterios: i) ser estable, ii) las perturbaciones deben ser minimizadas, iii) respuestas relativamente rápidas y suaves en los puntos de ajuste, iv) el error en estado debe ser eliminado, v) evitar acciones de control excesivas y vi) resistencia a las 1. Imprecisiones; con aplicaciones típicas no es posible cumplir estas condicionantes de manera simultánea, por lo que un sistema de control debe exhibir un rendimiento amplio para esta gama de ampliaciones siempre y cuando se utilicen ganancias proporcionales pequeñas y tiempos de respuesta grandes (Ornelas-Martínez & Cabrera-Ruiz 2018).

Atendiendo a la necesidad anterior, se han desarrollado diferentes trabajos referentes a sistemas de control para temperatura en procesos de destilación: Wu et al. (2014) utilizaron un control en múltiples lazos realimentados; Gil et al. (2015) proponen esquemas de doble lazo con controladores PI combinados con adelanto (feedforward) y la inclusión de un filtro para desacoplar el problema de seguimiento de la referencia y rechazo de perturbaciones y así disminuir la sobreoscilación; Wei et al. (2013) implementaron dos esquemas de control para un sistema de destilación de dos columnas, en el primer es-

quema se implementan lazos de control para el flujo, presión y temperatura, mientras que en la segunda es una modificación de la primera al tener los dos controladores de la arquitectura en cascada, dando mejores resultados con este último pues la respuesta es igual a la referencia; Aguirre-Maridueña et al. (2018) aplicaron un sistema de control de temperatura basado en un controlador PID para la destilación de hexano donde la respuesta de la planta es un sistema subamortiguado; Rowe et al. (2018) probaron dos arquitecturas de control de temperatura en un proceso químico-solar-térmico, en donde el primer controlador es un PID clásico con una perturbación en el lazo principal y el segundo un control implementa un estimador, en donde el mejor resultado se obtuvo con este último, teniendo las variables de la planta —porcentaje de monóxido de carbono, presión y temperatura— en los valores deseados, donde las oscilaciones de la temperatura fueron de  $\pm 2$ ; Luo et al. (2014) reportan la implementación de un controlador PI con adelanto y un tiempo muerto, de lo cual concluyen que el control es sensible a las perturbaciones del flujo, puesto que al aumentar el flujo de entrada un  $\pm 20\%$  la pureza en el proceso tiene una desviación positiva transitoria similar; Ortiz-Torres et al. (2016) desarrollaron un control tolerante a fallas para la regulación de la temperatura y presión en una columna de destilación, lo anterior mediante el diseño de dos observadores de error, utilizados para mejorar las acciones de una ley de control no lineal, lo anterior haciendo mediciones de concentración en cinco platos en la etapa de rectificación; Fitatá-Bojacá (2018) modeló un controlador PID con perturbaciones para un proceso de destilación binaria, comprobando por medio de simulación que el control de una válvula que controlaba la cantidad de fluido, donde la desviación es de 0.02m respecto a la referencia además que el porcentaje de encendido y apagado de la válvula controlada es del 54%; García-Jaimes & Rodríguez-Acevedo (2016) modificaron los lazos de control de una columna de destilación fabricada por la empresa Fratelli Guinazza, en donde estimó el modelo matemático en de la temperatura y el flujo de alimentación, para posteriormente implementar un control PI con un predictor Smith en el controlador AC800M en ambos sistemas obteniendo una reducción en el consumo de vapor del 22%; Dai et al. (2015) reportan el control de una columna de destilación reactiva, en el cual se implementó un controlador PI para presión, temperatura y flujo, al realizar pruebas variando el flujo  $\pm 20\%$  y la temperatura  $10^\circ$ , genera errores transitorios muy altos, por lo cual se propone una nueva configuración de la columna en la cual los errores transitorios son menores con un valor en estado estable de 0.995 para perturbaciones de  $\pm 2\%$ ; Dávila-Tapia (2013) Implementó una red neuronal dinámica para un estimador diferencial donde se consideraron 15 variables de proceso de entrada, teniendo como salida un parámetro de calidad, estando esta última en cascada con el flujo de aceite térmico utilizado en el proceso en un control PID, teniendo una desviación del 1.9% respecto a la referencia.

### 1.1.3. Control de procesos de destilación de etanol

En el caso particular del control de variables en el proceso de destilación de etanol se encuentran trabajos como los de Pérez-Nuñez et al. (2018) quienes realizaron adecuaciones en hervidor de una columna didáctica para destilación con la finalidad de implementar un sistema embebido que controla la temperatura, para ello se programó un control PI en dicha tarjeta en cual controlaba una termoresistencia por medio de un PWM, en donde recomiendan la realización de práctica con una concentración del 20% de etanol; Torres-Figuero (2014) estudió la respuesta no controlada y el control óptimo de una columna de destilación respecto a un flujo de etanol para destilación, las pruebas de control óptimo se realizaron mediante una entrada senoidal y una escalón, de las cuales se obtuvo una concentración del 99.5%; Fernández-Hernández (2013) reportó un control predictivo para una destilación binaria de etanol, donde se realizó una identificación para determinar el modelo

de la planta con un retardo de transporte, dando como resultado una simulación del controlador calculado, demostrando cualitativamente la robustez del controlador implementado; Gil et al. (2012) simuló un control de temperatura para un proceso de deshidratación extractiva, aplicándose un controlador PI tanto en las dos columnas de destilación como en el enfriador, dando como resultado una reducción en el sobrepaso de la respuesta del sistema así como en la velocidad de este; Villacres-Guijarro (2011) utilizó un controlador PID en Labview para regular la de temperatura de un destilador de platos.

## **1.2. Justificación**

### **1.2.1. Los combustibles fósiles**

En la actualidad la fuente de energía primaria a nivel mundial por excelencia son los combustibles fósiles. Lo que ha atraído consigo efectos negativos en el medio ambiente, por las altas emisiones de GEI y otras emisiones debidas a la quema de gas natural, carbón y los derivados del petróleo. A esto se suman los desastres naturales debidos a accidentes y derrames de petróleo a lo largo de su proceso productivo. Además, esta fuerte dependencia ha traído consigo problemas sociales a nivel mundial que desencadenan en conflictos bélicos por controlar el mercado de hidrocarburos (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016).

Debido a lo anterior y en mayor medida al problema del cambio climático los gobiernos han establecido la eliminación del uso de los combustibles fósiles a finales del siglo XXI a nivel mundial.

### **1.2.2. Los bioenergéticos**

Actualmente el uso de bioenergías se perfila como una de las fuentes alternativas claves para satisfacer las líneas de acción referentes a la eliminación de los combustibles fósiles. Lo anterior debido al potencial energético de la biomasa que se estima de 135 a 340 EJ/año, que equivale del 25 al 60% del consumo mundial respectivamente (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016, Creutzig et al. 2014). Aunado a esto, la factibilidad que tiene para satisfacer las necesidades en el sector de transporte (principalmente por ser una fuente de ignición o calor que se adecúa a vehículos actuales), el hecho de que es almacenable, escalable en su uso y producción y que su comercialización es madura, le brinda mayor versatilidad respecto a las otras fuentes de energía renovable (REMBIO 2011, Creutzig et al. 2014).

Respecto a los a los combustibles fósiles, presenta ventajas relacionadas con la parte ambiental, al fomentar la reducción de los GEI al ser sustituto de los combustibles fósiles y las emisiones de metano aunado a la reutilización de desechos orgánicos al ser convertidos en combustibles (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016, Edenhofer et al. 2012).

Económicamente los bioenergéticos implican costos por su ciclo de vida, generando un proceso económico en toda la cadena de suministros que este requiere, además del procesado, distribución y uso final, generando fuentes de trabajo de forma



indirecta en los lugares donde estos se implementan (Dale et al. 2015, Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016). Adicionalmente la sostenibilidad social y política de la bioenergía tiene como base el acceso equitativo de la energía sin privar a la sociedad del acceso a los alimentos básicos y el cultivo de fibras, cuidando no perjudicar las fuentes de empleo, ingresos o seguridad. Por el contrario, parte de la sostenibilidad bioenergética implica el respeto a los derechos de los trabajadores, salarios, seguridad social y condiciones justas de trabajo (Dale et al. 2015).

En el caso particular de México García et al. (2015) puntualiza la necesidad de políticas públicas que apoyen a posicionar los combustibles alternativos en un mercado competitivo, pues afirma la posibilidad de sustituir los combustibles fósiles.

### 1.2.3. Políticas para los biocombustibles

Si bien la producción de biocombustibles se ha visto favorecida por las necesidades actuales, un obstáculo actual son los costos de producción debido a que su elaboración es prácticamente exclusiva. Debido a esto, los esquemas actuales se encaminan hacia líneas que generen valor agregado y así reducir los costos de dicha producción. Estas acciones han fomentado la creación de biorrefinerías encargadas de agregar valor a la biomasa mediante su transformación en productos energéticos, de construcción, embalaje, entre otros (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016).

En el caso específico de los biocombustibles y en particular del bioetanol, la producción y uso se ha incrementado cada año, esto debido a las exigencias y políticas energéticas implementadas por los países. Ejemplo de lo anterior es Estados Unidos de América, que es el mayor productor de etanol a nivel mundial, esto impulsado por leyes tales como la Clean Air Act Amendments (CAAA) y las recomendaciones hechas por la US Environmental Protection Agency (USEPA) referentes al desuso del MTBE como oxigenante para las gasolinas —usando como sustituto el etanol—(Ghosh & Prelas 2011).

Por otra, parte Brasil siendo el segundo productor internacional de etanol ha aplicado políticas acerca del uso obligado de etanol en sus gasolinas. En el caso de la Unión Europea (UE) en el 2003 emitió las directivas que rigieron la política de biocombustibles hasta el 2010, en donde se adoptó el uso del 5.75% de consumo de estos en el sector de transporte, cual posteriormente se actualizó esta meta para ser del 10% para el 2020 para todos los integrantes de la UE. Por lo anterior el etanol se ha posicionado como el aditivo por excelencia para muchos países, y en varios más se ha dado la exigencia de su uso en lugar de la gasolina. En la Tabla 1.2, se muestran las exigencias de algunos país respecto a la mezcla de etanol con gasolina (Ghosh & Prelas 2011).

Tabla 1.2: Políticas para la mezcla de etanol en diversos países

País	Requisito de mezcla de etanol
Brasil	Toda la gasolina debe contener entre 20% y 25% de etanol anhidro
Canadá	Para 2010, el 5% de todo el combustible para vehículos automotores debe ser etanol o biodiésel

(Continúa en la página siguiente)

<b>País</b>	<b>Requisito de mezcla de etanol</b>
Francia	Establecer tasas objetivo para la incorporación de biocombustibles en combustibles fósiles (por contenido de energía ). Pide 5,75 % en 2008, aumentando a 10 % en 2010
Alemania	8 % de contenido energético en combustibles de motor para 2015 debe ser proveniente del etanol
Lituania	La gasolina debe contener 7-15 % de ETBE. El ETBE debe ser 47 % de etanol
Polonia	Se requiere que los biocombustibles representen un porcentaje establecido del uso total de combustible para el transporte. El estándar de 2008 es 3.45 %, con base al contenido energético
Argentina	Requirió el uso de mezclas de etanol al 5 % para 2010
Tailandia	La gasolina en Bangkok debe mezclarse con etanol al 10 %
India	Requiere 5 % de etanol en toda la gasolina
China	Cinco provincias chinas requieren mezclas de etanol al 10%: Heilongjian, Jilin, Liaoning, Anhui y Henan.
Las Filipinas	Requirió mezclas de etanol al 5 % en gasolina a partir de 2008. El requisito se expandió al 10 % en 2010
Bolivia	La expansión del etanol se mezcla al 25 % en los próximos 5 años. Los niveles actuales de mezcla son del 10 %
Colombia	Requirió mezclas de etanol al 10 % en ciudades con poblaciones de más de 500,000
Venezuela	El requisito de mezcla de etanol al 10 %

En el caso de México, el gobierno inició acciones referentes a la producción y uso del bioetanol mediante contratos de licitación para la producción de este combustible. En el 2008 y 2009, se expandió la Ley de Promoción de los Bioenergéticos (LPDB) y su reglamento enfocados en fomentar la sustitución de la gasolina y diésel por sus equivalentes bioenergéticos, lo que desencadenó en los lineamientos para regular los permisos de producción, almacenamiento, transporte y comercialización del etanol y el boidiésel, así como la Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos y el Programa de Introducción de Bioenergéticos por parte de la SENER (Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti 2016). En el 2013 se publicó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) que busca regular el aprovechamiento de las energías renovables para la generación de electricidad y formas de financiamiento aplicables a la transición energética (Camara de Diputados 2003), de los que se originaron: El Programa Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico que fomenta la producción de los insumos requeridos para los procesos bioenergéticos de forma segura y el Programa de Introducción de Bioenergéticos, este último sustituido por el Programa de Introducción de Etanol Anhidro. Sin Embargo, estos dos últimos programas no tuvieron éxito debido a los precios de compra ofrecidos por PEMEX, y la negativa del subsidio para la compra de etanol, aunado a esto el etanol no se consideró como un oxígeno sino como un componente de la gasolina (SENER 2014).

Dentro del Programa Sectorial de Energía 2013-2018 se estableció el objetivo de incrementar la cobertura de los combustibles y electricidad, en donde sus estrategias estuvieron encaminadas a incorporar a los biocombustibles en la matriz energética del país fomentando toda aquella actividad referente a la producción y aprovechamiento de todo tipo de bioenergéticos en el transporte, además se buscó apoyar la certificación de procesos y normalización de las especificaciones técnicas requeridas en este campo (Gobierno de la República 2013).

En el 2015 la Secretaría de Energía dio a conocer los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs), con el objetivo de desarrollar tecnologías, productos y servicios que permitan el aprovechamiento de las energías renovables. Estos centros se dividieron en cinco clústeres: i) biocombustibles sólidos, ii) bioalcoholes, iii) biodiésel, iv) biogás y v) bioturbosina. Que agruparon académicos, investigadores y empresas afines a cada ramo (SENER 2015). En el caso del clúster de bioalcoholes (CEMIE-Bio) este se ha enfocado en proyectos referentes a biocombustibles para el sector del autotransporte, donde una de sus líneas de acción es la transferencia tecnológica para la producción de bioetanol (Alcoholes 2020). Aunado a esto el gobierno federal actual a enfocado su plan de desarrollo en materia de energía la creación de refinerías y el mejoramiento de las ya existentes, dejando a las energías alternativas como fuente de producción de electricidad en comunidades y poblaciones aisladas (Gobierno de la República 2019).

De acuerdo a lo discutido por Garcá-Bustamante & Masera-Cerutti (2016) y atendiendo a lo reportado se concluye que las políticas del sistema energético mexicano no son suficientes, además de que están asiladas y no cuentan con una visión a largo plazo, por tal motivo cobra importancia la generación de tecnologías que reduzcan la cantidad y complejidad de los procesos para la obtención de biocombustibles y así mismo reducir los costos de producción de los mismo haciéndolos con ello más competitivo contra los combustibles fósiles, fomentando así la transición energética.

### 1.2.4. Regulaciones para el desarrollo de bioenergético

Para la regulación de los recursos energéticos el gobierno de México adoptó una estructura de tres niveles compuesta por: i) la constitución política, ii) leyes estatutarias y iii) las reglas y regulaciones requeridas por la ley con la finalidad de dar información más específica respecto al alcance de las mismas (Romero-Hernández et al. 2011, Solomon & Bailis 2014).

En el caso de los biocombustibles, el artículo 27 constitucional establece: La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada (Camara de Diputados 1917), lo cual enmarca que el dueño original de los recursos naturales es el estado. Aunado a ello establece el monopolio trasferido a PEMEX referente a los combustibles fósiles (Solomon & Bailis 2014), aun cuando en el 2017 se concretó la liberación de los precios de las gasolinas referente a la transición hacia mercados energéticos abiertos y competidos (Comision Federal de Competencia Económica 2019), PEMEX sigue siendo parte fundamental en las regulaciones energéticas en México.

Dentro del marco regulatorio, SENER (2016) establece que se requieren las condiciones que aseguren calidad y seguridad en su operación, teniendo en cuenta que su alcance esta en medida de que son bienes y servicios que se utilizan de forma local o de exportación. Dentro de estas regulaciones se incluyen:

- Consumo.
- Calidad.

- Métodos de prueba.
- Etiquetado.

En el caso específico del etanol, la pauta en las regulaciones la da la American Society for Testing and Materials (ASTM International), que tiene normas para el trabajo con etanol. Para el etanol utilizado como combustible en el auto-transporte se presentan las normas ASTM-D4806-19a y ASTM- D5798-19b. Partiendo de este hecho SENER (2018) estableció las especificaciones de calidad y características del bioetanol, biodiésel y bioturbosina. En dicha regulación se identifican las normas mostradas en la Tabla 1.3 para la calidad y características del bioetanol.

Tabla 1.3: Especificaciones de calidad y características del bioetanol

<b>Propiedad</b>	<b>Método de prueba</b>
Apariencia	Visual
Color	Visual
Etanol y alcoholes superiores C3-C5	ASTM D 5501 EN 15721
Etanol	
Alcoholes superiores C3-C5	EN 15721
Metanol	ASTM D 5501
Densidad a 20 ° C	ASTM D 4052
Conductividad eléctrica	ASTM D 1125
Acidez	ASTM D 6443
Goma lavada	ASTM D 381
	ASTM D 1193
Contenido de agua	ASTM E 203 ASTM E 1064 ASTM D 512
Contenido de cloruros inorgánicos	ASTM D 7319 ASTM D 7328-07
Contenido de cobre	ASTM D 1688
Azufre total	ASTM D 5453 ASTM D 7319
Sulfatos	ASTM D 7328 ASTM D 7328-07
Fósforo	EN 15487
Desnaturalizante	

La Tabla anterior es un extracto de la regulación vigente (SENER 2018), que marca que el bioetanol tiene uso final en el sector automotriz para ser mezclado con petrolíferos previo a su venta.

### 1.2.5. Costos en la producción de etanol

La evaluación del costo de producción de etanol debido a la gran cantidad de factores que le afectan que van desde la producción de las materias primas y su disponibilidad para este eso hasta las posturas sociales y políticas del país en donde se desarrolla dicha producción.

De acuerdo con Kazi et al. (2010), en Estados Unidos en el año 2010 el etanol estaba comenzando a ser comercializado por lo cual basándose en un análisis de crecimiento de costos que incluían materia prima, costos de operación variables y costos operativos fijos, aplicándose como caso de estudio en una planta pionera en ese país. Los costos abarcaron el pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación, obteniendo un costo entre los 156 y 173 millones de dólares dependiendo del pretratamiento utilizado, con un rendimiento promedio del 294.5 l/Mg, además, enfatiza que la destilación es un proceso costoso y que el costo aumenta a medida que se disminuye la concentración de etanol.

Para México la producción de etanol es una actividad económica relativamente nueva, en ella se involucran costos agrícolas, transporte de materia prima, inversión, transformación, almacenamiento, distribución y comercialización, principalmente (Becerra-Pérez 2009).

Tomando como base los costos obtenidos por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) y Secretaría de Energía (Sener) (2006) referente a los insumos por parte de los cultivos de caña de azúcar, maíz, yuca, sorgo y remolacha azucarera; transformación, contemplando las tecnologías disponibles y maduras (hasta el año 2006); Inversiones a una tasa de descuento del 12 %; una vida económica de 10 años; y costos de operación y mantenimiento. Los datos de los gastos totales a los que llegaron en dicho estudio se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4: Costo de producción de etanol en México (Becerra-Pérez 2009)

Concepto	Caña, miel pobre		Caña, miel rica		Caña, jugo directo		Caña, jugo +hidrólisis		Maíz, vía seca		Sorgo		Yuca		Remolacha	
	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%	dll/litro	%
<b>Materias primas</b>	0.26	63	0.21	41	0.27	63	0.22	37	0.30	68	0.59	72	0.30	38	0.44	64
<b>Inversión</b>	0.09	22	0.09	18	0.10	23	0.26	43	0.07	16	0.13	16	0.23	29	0.15	22
<b>Energía</b>	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.07	16	0.00	0	0.15	19	0.00	0
<b>Otros</b>	0.06	15	0.21	41	0.06	14	0.12	20	0.00	0	0.10	14	0.11	14	0.10	14
<b>Total</b>	0.41	100	0.51	100	0.43	100	0.60	100	0.44	100	0.82	100	0.79	100	0.69	100

Así mismo en la Figura 1.2 se muestra la distribución en porcentaje de los costos de producción del etanol, del cual aunado a la Tabla 1.4 se concluye que los costos mayores en la producción de etanol son los derivados de la materia prima y del método por el cual se obtiene el etanol (Becerra-Pérez 2009).

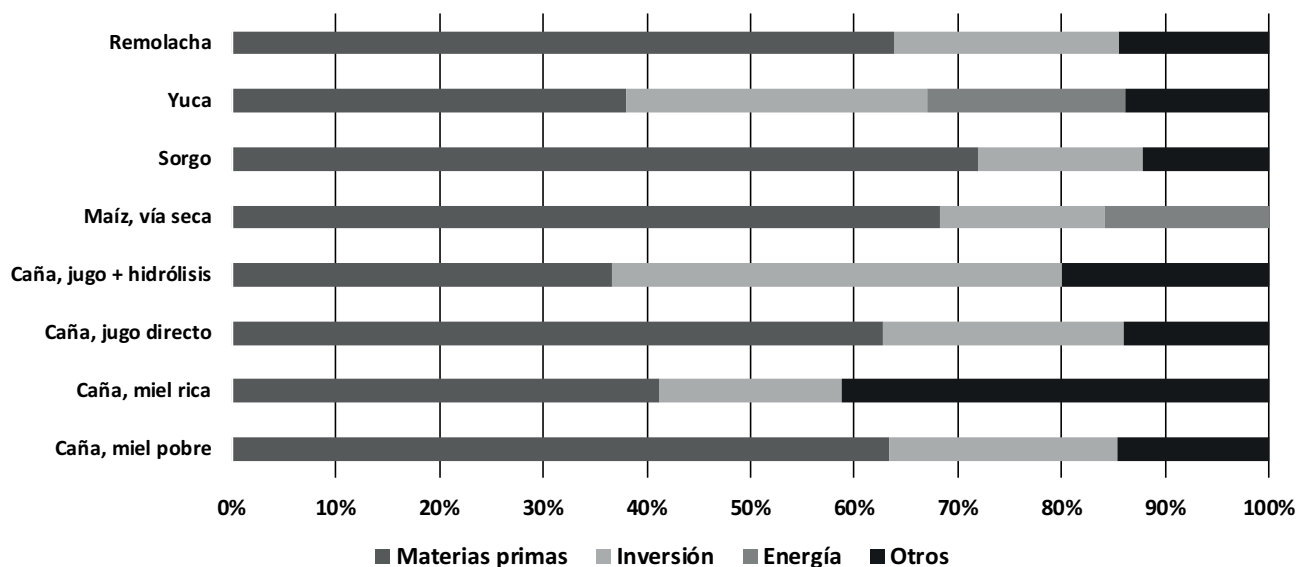


Figura 1.2: Distribución en porcentaje de los costos de producción de etanol en México, (Becerra-Pérez 2009, Horta-Noriega 2006)

Atendiendo a las observaciones hechas por Kazi et al. (2010) y Becerra-Pérez (2009) se observa que una parte fundamental de los costos de producción del etanol se da en los gastos del proceso, en donde la destilación se marca como un subproceso más costoso. Sabiendo que actualmente el uso del etanol es como sustituto de la gasolina o en una combinación con esta de acuerdo a lo reportado por Karimi et al. (2019) es necesario que la cantidad de agua en el etanol sea menor al 0.5 % en peso.

Por otra parte, Karimi et al. (2019) la mayoría de los estudios de deshidratación se lleva en la fase de vapor debido a las limitaciones de las condiciones de funcionamiento, por ejemplo, los cambios de presión en donde los controladores de este tipo son más estables en la fase vapor.

Weitkamp et al. (1991) cometa que los materiales hidrofóbicos mejoran su comportamiento cuando se disminuye el aumento de la temperatura. Lo anterior es ratificado por Baylak et al. (2012) que concluyeron que la concentración de etanol disminuye a temperaturas más altas, lo cual se reflejó en la curva de avance de la concentración, en donde a medida que aumentaba la temperatura la pendiente de la curva de agua se hacía más pronunciada, debido a ello el etanol de grado combustible no se alcanzó a los 90°C.

**1.2.6. Vigilancia Tecnológica**

Al realizar la revisión de las patentes relacionadas con el presente trabajo en las plataformas de Google Patents y WIPO patentscope se encontraron los siguientes trabajos: Brown (2009) desarrolló un sistema para producir etanol de una fuente orgánica que opera para purificar y secar etanol de una fuente de cerveza. El sistema para producir etanol anhidro incluye: i) una columna de destilación que opera entre 160 y 220 °F, ii) una columna de destilación y rectificación que tiene una temperatura mayor que la primera (entre 240 y 320 °F), iii) un dispositivo de deshidratación de tamiz molecular conectado después de la segunda columna y iv) un elemento de control de energía. El proceso anterior trabaja a presiones que van de 30 a 100 psi; Nguyen (2014) registró un procedimiento de pretratamiento de materia prima de biomasa celulósica que comprende celulosa, hemicelulosa, y lignina en donde la biomasa es tratada a una presión manométrica de 517 kPa a 1724 kPa y a una temperatura de 160 a 230 °C que es posteriormente es despresurizada en un proceso controlado en presión y temperatura con rangos de 34,5 kPa a 344 kPa y 110 °C a 150 °C, respectivamente; Evanko et al. (2012) reporta un método para la recuperación de alcoholes C3-C6 de soluciones acuosas diluidas, tales como fermentaciones, donde estos dos pasos se pueden realizar simultáneamente, incrementando la actividad del alcohol C3-C6 en una porción, proporcionando una productividad volumétrica mejorada para la fermentación y permitir la recuperación de dicho alcohol, permitiendo un uso reducido de energía en el proceso. En estas patentes se observa que los procesos se realizan a altas presiones y temperaturas de vapores saturados durante el proceso, involucrando columnas de destilación, aunado a esto buscan reducir el coste energético del proceso.

**1.3. Nivel de Madurez Tecnológica**

Como punto de partida tomando en cuenta el capítulo 1 del presente trabajo y de acuerdo con el Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta (2019) en concordancia con el Anexo 1. (Guía del TRL) de la misma, se tiene un nivel de madurez tecnológica (TRL) de 2.2 en cual es mostrado en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5: Extracto de la tabla de Guía del TRL (Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta 2019)

Nivel de Madurez de Tecnológica (TRL)	Elementos clave	ID	Parámetros esperados al final de la etapa. Si no ha cumplido con los siguientes aspectos, se encuentra en un nivel inferior del TRL...	Conteste sí o no	Checklist de información soporte que se incluye como parte de los insumos para la evaluación de la propuesta. Por favor identifique el nombre del archivo que contiene la evidencia para cada pregunta (artículos, tesis, libros, etc.) con el siguiente protocolo: TRL5.1, TRL5.2, TRL6.1, TRL6.2, TRL6.3, etc.
1	Investigación básica. Principios básicos observados y reportados.	1	¿Finalizó con la investigación básica de su idea?	sí	Estado del arte, quien desarrollo eso antes, evidenciar, alguien ya avanzó ese camino y lo esta dejando. Voy a sustituir la tecnología remata por la mía, describir el problema y el conocimiento que resuelve el problema, dame el problema. la solución y a quien se lo resuelve, (INEGI, cobertura, geografica), formalizar datos del problema, descripción del problema y la tecnología en el conocimiento que lo resuelve, publicaciones, reporte técnico, que CONOCIMIENTO Fenómenos de la raza que hablen de la tecnología (palabras clave), google académico, el principio nuevo es mi proyecto, hay solo CONOCIMIENTO pero puede ser utilizado para venderse, (que inventarías hay y analiza los artículos, detecta en ellos si tu conocimiento es novedoso), 7 publicaciones trascendentales, tecnologías que se pueden desarrollar, elegir la relevante, una ronda de focus group y cliente, sale el fenómeno que sustenta el negocio.
	Artículos científicos publicados sobre los principios de la nueva tecnología.	2	¿Identificó principios de investigación básica que pudieran trasladarse en principios nuevos que puedan ser utilizados en nuevas tecnologías?	sí	Diagramas: intersección de tecnología, patentes, el termino A de 17 patentes con el B que tiene 24 puntos de enlace revisables, nacionales e internacionales, análisis de patentes y que protege cada una y no coincide con ningún reclamo de ellos, Considera que vas a experimental, a pesar de no tener la funcionalidad, como vendes tu proyecto para entender que hay una forma factible para resolver el problema por eso se plantea
Desarrollo de la invención	Investigación de Laboratorio. Concepto tecnológico y/o aplicación tecnológica formulada. Investigación aplicada.	1	¿Identificó principios de investigación básica que pudieran trasladarse en principios nuevos que puedan ser utilizados en nuevas tecnologías?	sí	Gerentes compran y toman decisión, el de calidad es el usuario. Software de música se vende al pupá y lo usa el niño
	Publicaciones o referencias que subrayan las aplicaciones de la nueva tecnología. Inicio de la invención.	2	¿Realizó un análisis de los artículos científicos, modelos o teorías científicas que respaldan la aplicación de la idea en algún área tecnológica?	sí	
		3	¿Realizó estudios de búsqueda y análisis de patentes a nivel nacional e internacional, y los resultados indicaron que no existe un desarrollo igual a su idea? (bench mark tecnológico)	no	
		4	¿Ha explorado principios básicos de manufacturabilidad?	no	

(Continúa en la página siguiente)



Nivel de Madurez de Tecnológica (TRL)	Elementos clave	ID	Parámetros esperados al final de la etapa. Si no ha cumplido con los siguientes aspectos, se encuentra en un nivel inferior del TRL...	Conteste sí o no	Checklist de información soporte que se incluye como parte de los insumos para la evaluación de la propuesta. Por favor identifique el nombre del archivo que contiene la evidencia para cada pregunta (artículos, tesis, libros, etc.) con el siguiente protocolo: <b>TRL5.1, TRL5.2, TRL6.1, TRL6.2, TRL6.3, etc.</b>
5			¿Ha explorado posibles usuarios de la invención?	sí	<p>Buscar aliados que nos den esa certeza, con el rediseño necesitamos alguien que nos de factibilidad de que se puede resolver. Viabilidad financiera podría ser, si apuestas con cuanto y es identificar el escenario, como se si es viable o no, solo con una hipótesis.</p> <p><b>FACTIBILIDAD TÉCNICA CONSIDERAMOS QUE PODEMOS HACER BILLETES; QUE SI PUEDO Y SE. LA HIPÓTESIS DE QUE EL MERCADO TIENE PROBLEMAS SOCIALES, INCLUYE VIABILIDAD POR SER INNOVACIÓN SOCIAL. A PESAR DE INNOVACIÓN SOCIAL SE REQUIERE MOSTRAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA, YA ME VI CONTEMPLANDO LA SOLUCIÓN QUE IMPLICA EL EQUIPO, MATERIALES Y PROCESO, hay algo en patentes que se dé a través de un análisis primario, la protección intelectual inicia cuando no existe algo, poner el análisis de patentes del impi, adelantaste de ORBIT, THOMPSON, —convertir en una estrategia de protección intelectual inicial, no proponer aun, no sabes que encontrar, si quieres guardar secreta en caja negra, lo puedes hacer con notario por secreto industrial, lo que pide es que puedes mezclar el mecanismo, estrategia, modelo, patente. La marca nace antes que el producto, desde el render establece el impacto que quieres, dar en la población objetivo. Sacar la marca antes de la tecnología antes de que se desarrolle.</b></p> <p>Un logotipo es una estrategia de posicionamiento previa al posicionamiento. Potenciales tecnologías a proteger, que problema resuelve y hasta donde va, tecnología contra y concurrentes,</p>
6			¿Cuenta con un grupo de investigación que pueda facilitar la evaluación inicial de factibilidad de la tecnología?	no	

Atendiendo lo plasmado en la Tabla 1.5 se presenta el concentrado de la Tabla 1.6 donde se sustentan los puntos reportados.

Tabla 1.6: Análisis del TRL Inicial

Parámetro de la etapa	Información de soporte
1.1 ¿Finalizó con la investigación básica de su idea?	Como parte del desarrollo de la presente tesis, se realizó un análisis de los procesos de destilación del etanol, su estado actual y los antecedentes de este como se puede observar en los apartados 1.1.1, 1.2.2, 1.2.3 y 1.2. 4 4.
1.2 ¿Identificados principios de investigación básica que podrían trasladarse en principios nuevos que podrían ser utilizados en nuevas tecnologías?	En los apartados 1.1.1.1 y 1.1.2 se tratarán de identificar y describir los pasos en el proceso de destilación de etanol y las técnicas de control utilizadas en estos procesos.
2.1 ¿Realizó un análisis de los artículos científicos, modelos o teorías científicas que respaldan la aplicación de la idea en algún área tecnológica?	Se ha realizado una revisión y discusión de los artículos científicos referencias a las técnicas de control utilizadas para los procesos de destilación dicho análisis se presenta en las secciones 1.1.2 y 1.1.3 del presente trabajo.
2.2 ¿Realizó estudios de búsqueda y análisis de patentes a nivel nacional e internacional, y los resultados indicaron que no existe un desarrollo igual a su idea? (Benck Mark tecnológico)	En el apartado 1.2.6 se realizó una búsqueda de patentes relacionadas con los sistemas de control de temperatura en los procesos de destilación.
2.3 ¿Ha explorado los principios básicos de manufacturabilidad?	No.
2.4 ¿Ha explorado posibles usuarios de la invención?	No

(Continúa en la página siguiente)

Parámetro de la etapa	Información de soporte
2.5 ¿Cuenta con un grupo de investigación que pueda facilitar la evaluación inicial de factibilidad de la tecnología?	Para el desarrollo del presente trabajo están participando el cuerpo académico de robótica y control avanzado con clave ITESHUIC-CA-1 y el cuerpo académico de desarrollo y aplicación de bioenergía con clave ITESHUIC-CA-2, pertenecientes a las Divisiones de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería en Energías Renovables del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan.
2.6 ¿Tiene contemplado un plan de licenciamiento de tecnología a terceros?	No.

## 1.4. Objetivo

Separar una mezcla azeotrópica mediante un sistema de control de temperatura para la destilación de etanol al 99%.

### 1.4.1. Objetivos particulares

1. Diseñar un proceso de destilación azeotrópica mediante intercambiador calor.
2. Obtener un perfil de temperatura mediante la simulación de un sistema binario.
3. Instrumentar la planta de destilación mediante la implementación de un dispositivo programable para medir la temperatura del proceso.
4. Desarrollar un prototipo de planta de destilación mediante un evaporador para realizar pruebas de temperatura.
5. Caracterizar la planta mediante un proceso de identificación para determinar la respuesta del sistema.
6. Desarrollar un sistema de control de temperatura aplicando un controlador que se adapte a la respuesta requerida en el proceso para la destilación de etanol.
7. Evaluar el sistema de control de procesos mediante simulación para determinar la concentración del etanol obtenida.

1.

---

# Capítulo 2

En este capítulo se describe el método desarrollado para la presente tesis. Como se mencionó en los apartados anteriores el desarrollo de sistemas que fomenten la simplificación de procesos es importante para reducir costos de producción en el caso específico del bioetanol, fomentando con ello el uso del mismo, ya sea como sustituto de la gasolina o en combinación con esta última. Por ello elevar las concentraciones de etanol en el primer proceso de destilación es imperante.

## 2.1. Planteamiento

Atendiendo a las actividades marcadas en los objetivos se propusieron las siguientes fases: i) Modelo 3D, se generó la propuesta para la planta que consistió en un evaporador y un destilador; ii) Fabricación, se detallan los pormenores de la fabricación de la planta identificando los materiales utilizados; iii) Instrumentación, en este paso se describen los sensores, elementos eléctricos y electrónicos utilizados, así como la interacción de estos en la realización de pruebas para la identificación; iv) Modelado, se describe la identificación de la planta utilizando un modelo con retardo, así como el perfil de concentración de la mezcla etanol-agua relacionando la dinámica del sistema con el comportamiento de dicho perfil; v) PID vs predictor Smith, se propone el estudio de dos tipos de control por un lado el controlador PI y por otro el predictor Smith, comparando sus comportamientos bajo diferentes condiciones por medio simulación. Los pasos anteriores se muestran en la Figura 2.1.

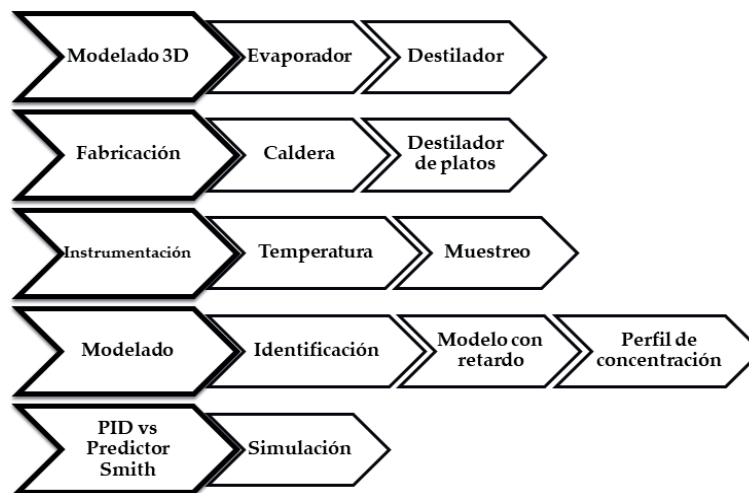


Figura 2.1: Diagrama las fases y procesos utilizados para el desarrollo presente trabajo

## 2.2. Diseño CAD

De acuerdo al planteamiento del presente trabajo, se requirió de un diseño computacional para dimensionar el evaporador y destilador a realizar del cual se muestra su disposición en la Figura 2.2

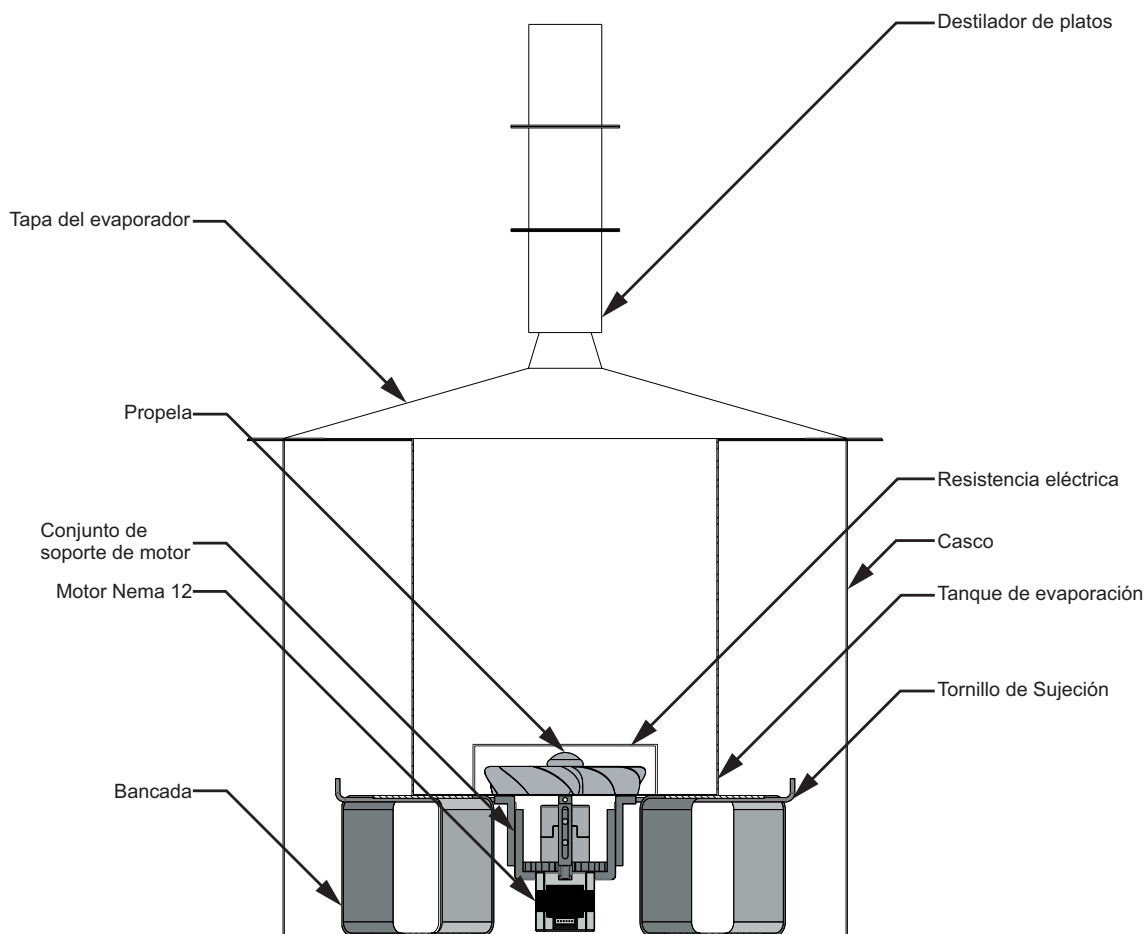


Figura 2.2: Disposición física de la planta

La integración mostrada en la Figura 2.2 se planteó para realizar los procesos de evaporación controlada y la separación por condensación, para ello se dispusieron los componentes en la configuración presentada, los cuales se describen a continuación.

**Casco** Es la cubierta externa del evaporador, cuya finalidad es alojar el fluido evaporado en el proceso de destilación, además, funge como soporte para los elementos contenidos dentro de él.

**Tanque de evaporación** En este se almacena la mezcla a evaporar, además tiene montado en él dos sensores de temperatura, la propela y la resistencia eléctrica.

**Propela** Está montada en el tanque de evaporación y conectada en su parte baja a un motor nema mediante un acoplamiento flexible. Tiene como finalidad generar un flujo dentro del evaporador en la mezcla a evaporar para homogeneizar la temperatura.

**Resistencia Eléctrica** Está montada dentro del evaporador en un soporte, su finalidad es elevar la temperatura de la mezcla hasta el punto de evaporación del agua, esto con la implementación de un controlador de temperatura que regula su funcionamiento.

**Motor Nema** Es un motor destinado a generar el flujo de fluido dentro del tanque de evaporación en conjunto con la propela, este tiene la velocidad regulable.

**Conjunto de soporte del motor** Para soportar el motor dentro del arreglo, se ideó un subensamble (Figura 2.3) que el consta de una base de acoplamiento para el motor la cual va adherida al motor nema mediante cuatro tornillos, a la base van acoplados cuatro postes fijos que a su vez van unidos a cuatro postes móviles que es su conjunto ayudan a regular la altura de ensamble, de los conectores del motor y de la propela para accionar esta última, dicho ajuste se logra: i) regulando la altura de sujeción por medio de los postes móviles y fijos los cuales se ensamblan por medio de dos tornillos respectivamente; ii) regulando la unión con el tanque de evaporación por medio de los tornillos de sujeción.

**Tornillos de sujeción** Junto con el conjunto de soporte del motor estos tornillos en forma de "L" se encargan de sujetar al motor con el tanque de evaporación por medio de una unión rígida en cuatro puntos de contacto tangentes en su periferia.

**Bancada** Son cuatro soportes cuadrados que se encargan de separar el tanque de evaporación del fondo del casco, a una altura suficiente para poder alojar en la parte baja al ensamble del motor.

**Tapa del evaporador** Es un cono truncado con un conector en forma de embudo en la parte superior que conecta con el destilador de platos, tiene como finalidad tapan el casco para generar el evaporador, está ensamblado a este por medio de ocho uniones atornilladas.

**Destilador de platos** Consta de una torre modular de platos en los cuales se da la condensación del agua y el alcohol a diferentes alturas con la finalidad de separar estos.

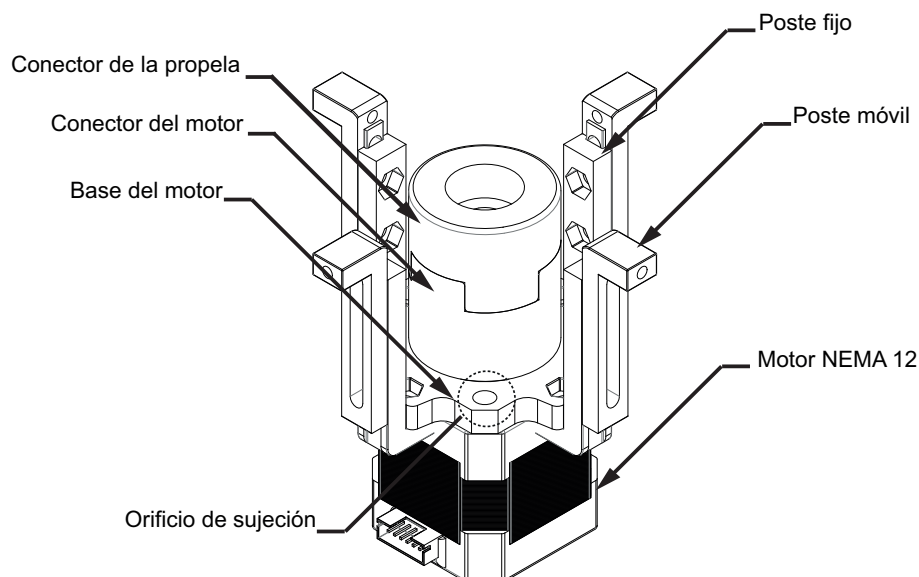


Figura 2.3: Conjunto de soporte del motor

Aunado a las disposiciones anteriores también se hacen los preparativos para la inclusión de dos sensores de temperatura tipo K y un orificio para el cableado de los sensores, residencia y motor.

## 2.3. Análisis de la planta

Previo al proceso de simulación del control, es necesario obtener el modelo de la planta de estudio, para el cual se utilizaron datos de una prueba de calentamiento de un recinto con capacidad de 30 litros de agua –debido a las condiciones de confinamiento no fue posible realizar la prueba con la mezcla etanol agua, sin embargo, el cambio en los flujos no es significativo puesto que el gradiente de densidades es bajo, como se analizará en la sección 2.3.2–, la prueba se realizó utilizando una residencia de 1500 watts activada mediante un relevador de estado sólido marca Fotek modelo SSR-40DA y activada por un pwm al 100% generado en un Arduino Mega.

### 2.3.1. Identificación

Para obtener el modelo de la planta se realizó un proceso de identificación utilizando el software Matlab, el cual consistió en 4 pasos: i) Obtener los datos de una prueba experimental sujeta a las condiciones mencionadas en el apartado anterior y utilizando sensor de temperatura tipo K acoplado a un módulo MAX6675 con una velocidad de muestreo de 1.5 segundos mediante el código presente en el anexo B; ii) Escribir en un block de notas los datos muestreados; iii) Introducir los datos muestreados utilizando el código de Matlab presente en el anexo C, en donde se despliega una gráfica con los datos muestreado y la referencia de temperatura utilizada; iv) Utilizar el toolbox ident de Matlab y realizar la siguiente secuencia para obtener la función de transferencia de la planta:



**Cargar los valores de entrada** Introducir los valores de la referencia de la planta y la salida de la misma, ref y A respectivamente, así como el tiempo de muestreo que fue de 1.5 segundos, como se observa en la Figura 2.4(a).

**Estimación de la planta** Seleccionar la técnica de estimación de la planta, en este caso process model para incluir un modelo con tiempo muerto (delay).

**Obtener la función de transferencia** Ejecutar el cálculo de la función de transferencia y obtener las variables de tiempo y retardo respectivamente.

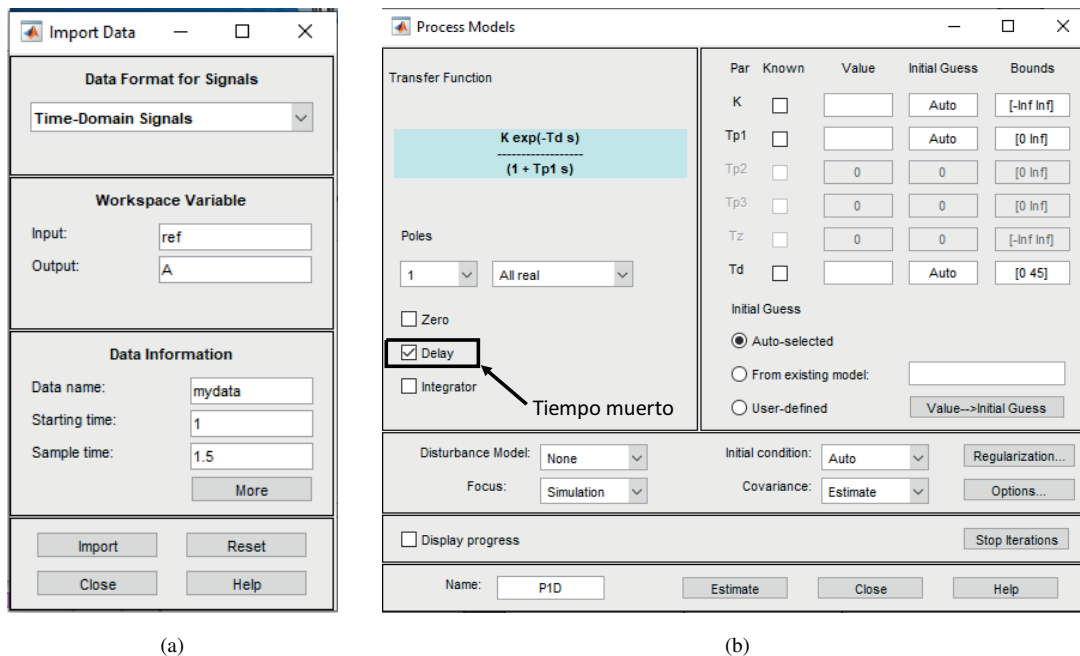


Figura 2.4: (a) Entrada de datos para identificación; (b) Identificación de procesos con tiempo muerto

Los pasos 2 y 3 se pueden observar en la Figura 2.4 (b).

### 2.3.2. Análisis temperaturas de separación y concentraciones

Partiendo de que el proceso de evaporación utilizado en el presente trabajo es el de una mezcla binaria donde los componentes de esta tienen diferentes puntos de evaporación, es necesario determinar el perfil de temperatura considerando las características físico-químicas para que la separación sea efectiva, es decir que solo uno de los dos componentes se evapore –en este caso es el etanol por ser el componente más volátil de la mezcla–. Para determinar dicha curva se utilizó el programa ChemSep, que presenta las herramientas requeridas para este fin, utilizando los siguientes parámetros:

**Componentes** Etanol y agua.

**Operación** Columna en equilibrio con destilación simple sin condensador ni hervidor.

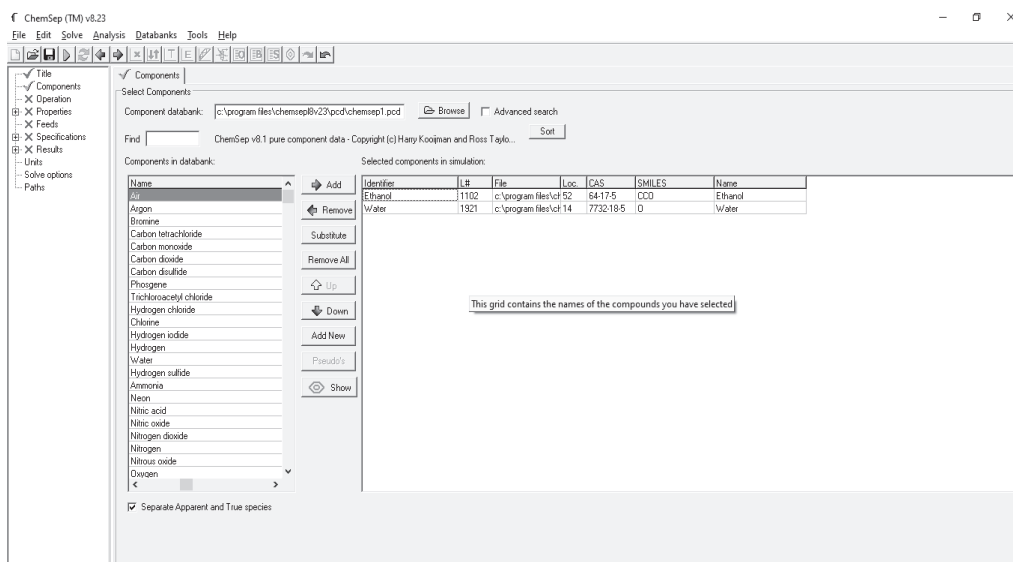
**Propiedades** Valor de K: Gamma-phi, ecuación de estado: gas ideal, coeficiente de actividad: NRTL, presión de vapor:

Ecuación de Antoine, sin entalpía.

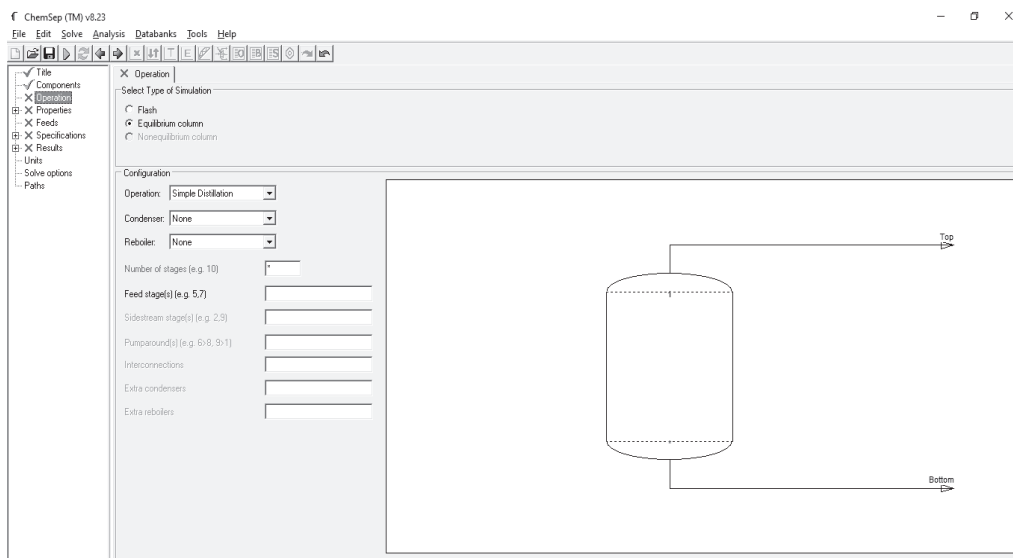
**Unidades** Temperatura: °C, presión: atmósferas, y todas las demás por default del programa.

**Análisis** Diagrama de fases → binarias.

**Diagrama de fases binarias** Tipo: Temperatura vs concentración de etanol vs concentración de agua (Txy), Fase: VLE, presión: 1 atmósfera.

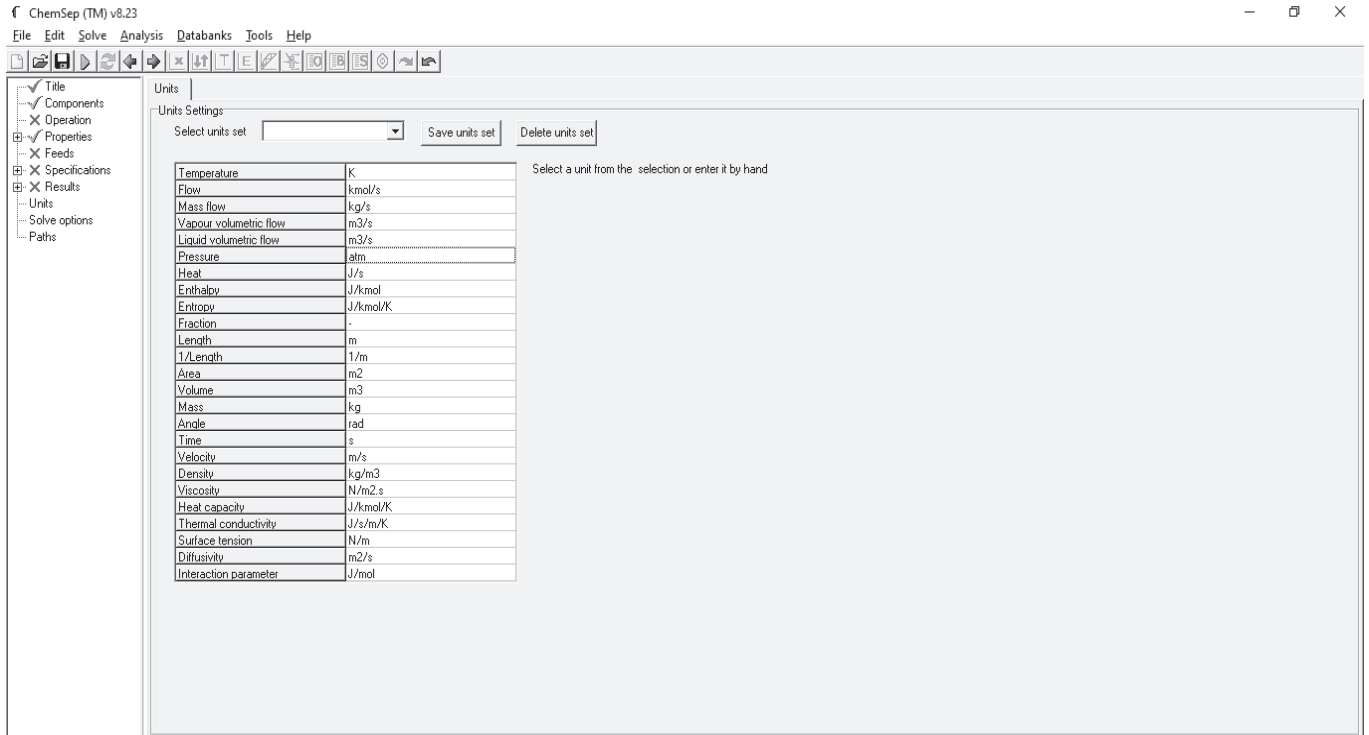


(a)

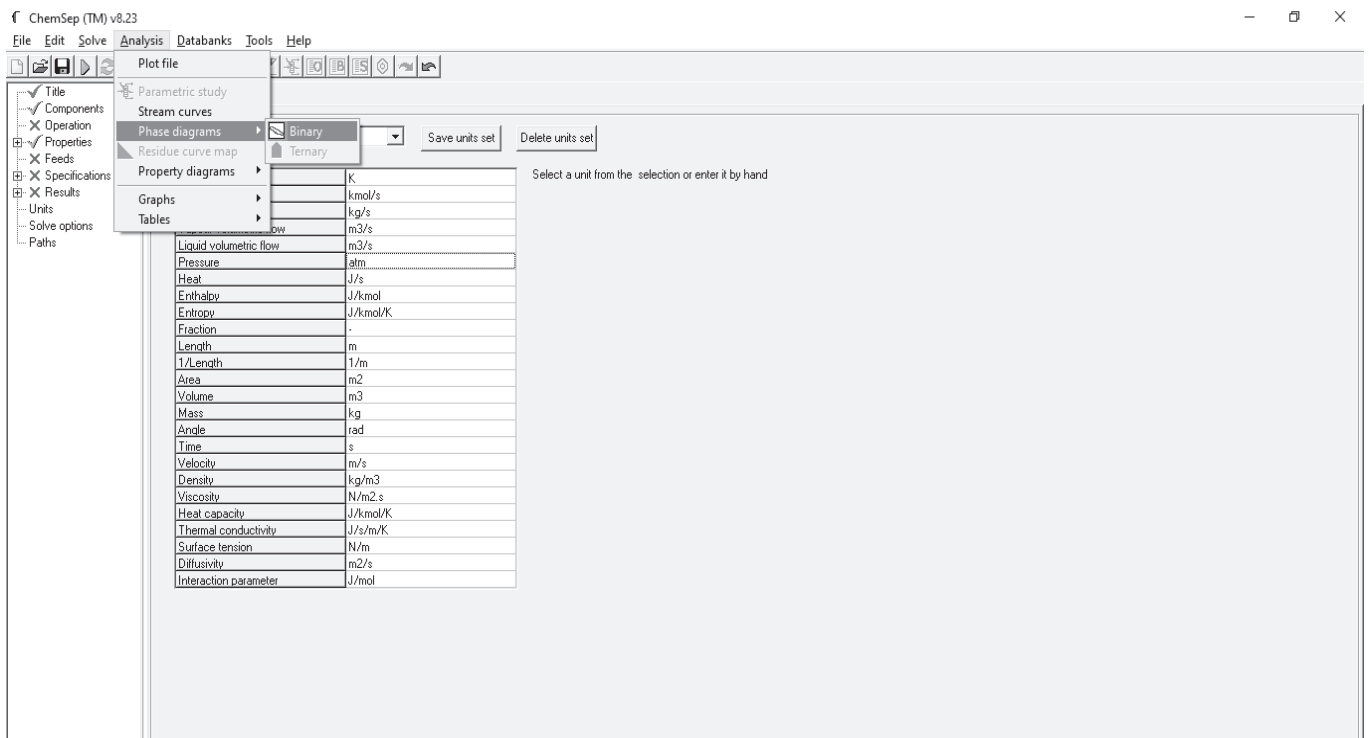


(b)

Figura 2.5: (Continúa en la siguiente página)

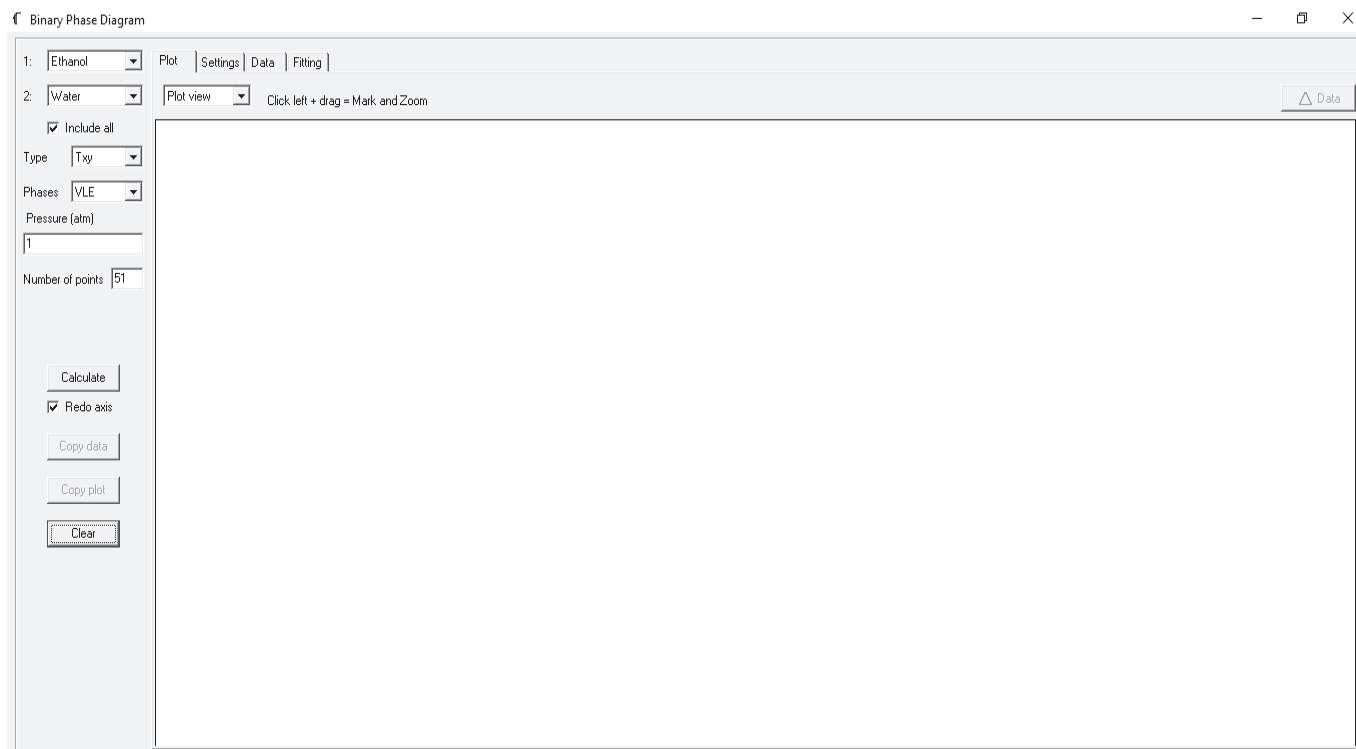


(c)

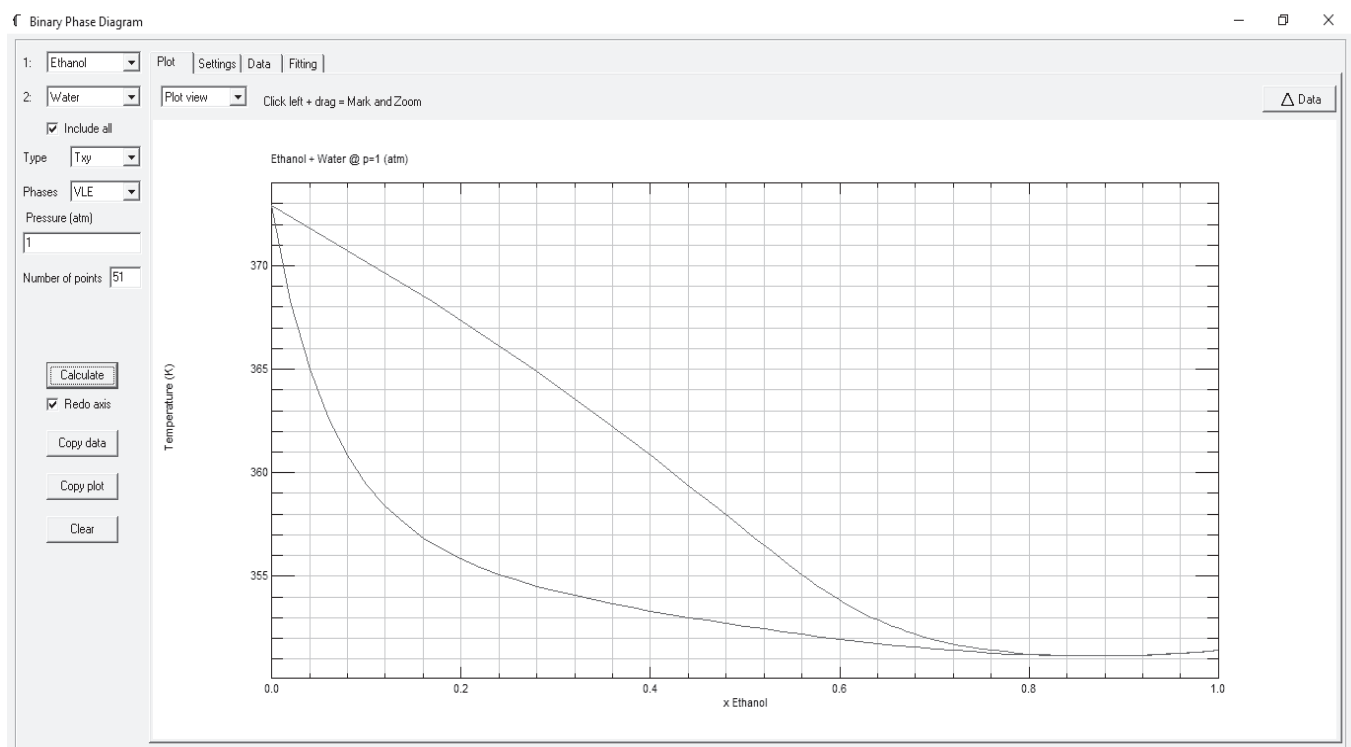


(d)

Figura 2.5: (Continúa en la siguiente página)



(e)



(f)

Figura 2.5: Interfaz del software ChemSep: (a) Ventana de componentes; (b) Ventana de operación; (c) Ventana de propiedades; (d) Ventana de análisis; (e) Ventana de diagrama de fases binarias; (f) Ventana de resultados

Con los parámetros anteriores se configuró la interfaz de ChemSep como se muestra en la Figura 2.5, y los datos generados se procesaron y ordenaron mediante un programa en Matlab donde se determinó por gradientes térmicos el tiempo necesario para incrementar la temperatura de la mezcla atendiendo: el volumen, temperatura inicial, concentración y densidad, donde el calor necesario para cambiar la temperatura de la mezcla y tiempo se calcula mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

$$Q = \rho * V * CP * \Delta T \quad (2.1)$$

$$t = Q/P \quad (2.2)$$

donde:

- $Q$  = Calor necesario para el cambio de temperatura ( $J$ ).
- $\rho$  = Densidad de la mezcla ( $g/ml$ ).
- $V$  = Volumen de la mezcla ( $l$ ).
- $CP$  = Calor específico de la mezcla ( $J/KgC$ ).
- $\Delta T$  = Cambio de temperatura ( $C$ ).
- $t$  = Tiempo necesario para el cambio de temperatura ( $s$ ).
- $P$  = Potencia de la fuente de calor ( $W$ ).

Cabe mencionar que la temperatura es una función de la concentración partiendo de los datos reportados por Cerquera & Acosta (2016) y Pérez-Ones et al. (2010) se realizó un ajuste de curvas con un coeficiente de correlación de 0.9986 respecto a los datos, la ecuación 3.1 discutida en la subsección 3.2.2.3. Dicha ecuación se obtuvo de los datos mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Fracción molar vs densidad (Cerquera &amp; Acosta 2016)

Muestra	Fracción molar		Densidad (g/ml)
	X Etanol	Y Agua	
1	0.00	1.00	0.9839
2	0.03	0.97	0.9682
3	0.07	0.93	0.9572
4	0.12	0.88	0.9447
5	0.17	0.83	0.9295
6	0.24	0.76	0.9123
7	0.55	0.45	0.8474
8	0.74	0.26	0.8180
9	1.00	0.00	0.7793

El programa desarrollado en Matlab para el análisis del tiempo de calentamiento de la sustancia partió de los datos obtenidos en ChemSep, los cuales fueron ordenados de forma creciente respecto a la temperatura con la finalidad de tener un gradiente positivo en el análisis, posterior a ello se calculó la densidad correspondiente a cada valor con la ecuación 3.1, y de forma subsecuente el calor necesario para el cambio de temperatura (ecuación 2.1) y el tiempo necesario para dicho cambio (ecuación 2.2), dichos valores se guardaron en sus vectores correspondientes, para finalmente graficar el tiempo acumulado vs la temperatura alcanzada. El código desarrollado se muestra en el anexo D.

Derivado del cálculo de la temperatura, se desarrolló el programa en Matlab (anexo E) el cual relaciona la fracción molar vs la densidad, en donde utilizaron los datos de ChemSep y se ordenaron ascendientemente atendiendo a la fracción molar de etanol para después calcular la densidad a partir de la ecuación 3.1, y finalmente graficar la fracción molar contra la densidad.

### 2.3.3. Ajuste de la curva de temperatura de evaporación

Partiendo de la curva de concentración vs temperatura obtenida en el apartado anterior, se realizó un ajuste de curva para el comportamiento de la concentración respecto a la temperatura de evaporación. Para ello se utilizaron los datos de la curva arrojados por ChemSep, los cuales se procesaron en Matlab haciendo uso del código del anexo F. De donde se tomaron los valores de los vectores  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{T}$  para ser utilizados en el toolbox Curve Fitting de Matlab.

Para realizar el ajuste de curva en el toolbox Curve Fitting se siguieron los siguientes pasos:

1. Cargar los datos generados en ChemSep en el entorno de Matlab mediante el programa presente en el anexo F.
2. Cargar los datos de temperatura de evaporación (vector **T**) correspondiente a la variable independiente en la interfaz del toolbox Curve Fitting; del mismo modo cargar los datos de la concentración (vector **r**) en la variable dependiente.
3. Mediante una prueba heurística realizar el ajuste de curva registrando aquellas que tengan un índice de correlación mayor al 90% observando que la curva no presente distorsión respecto al comportamiento de los datos.
4. Evaluar las curvas obtenidas.

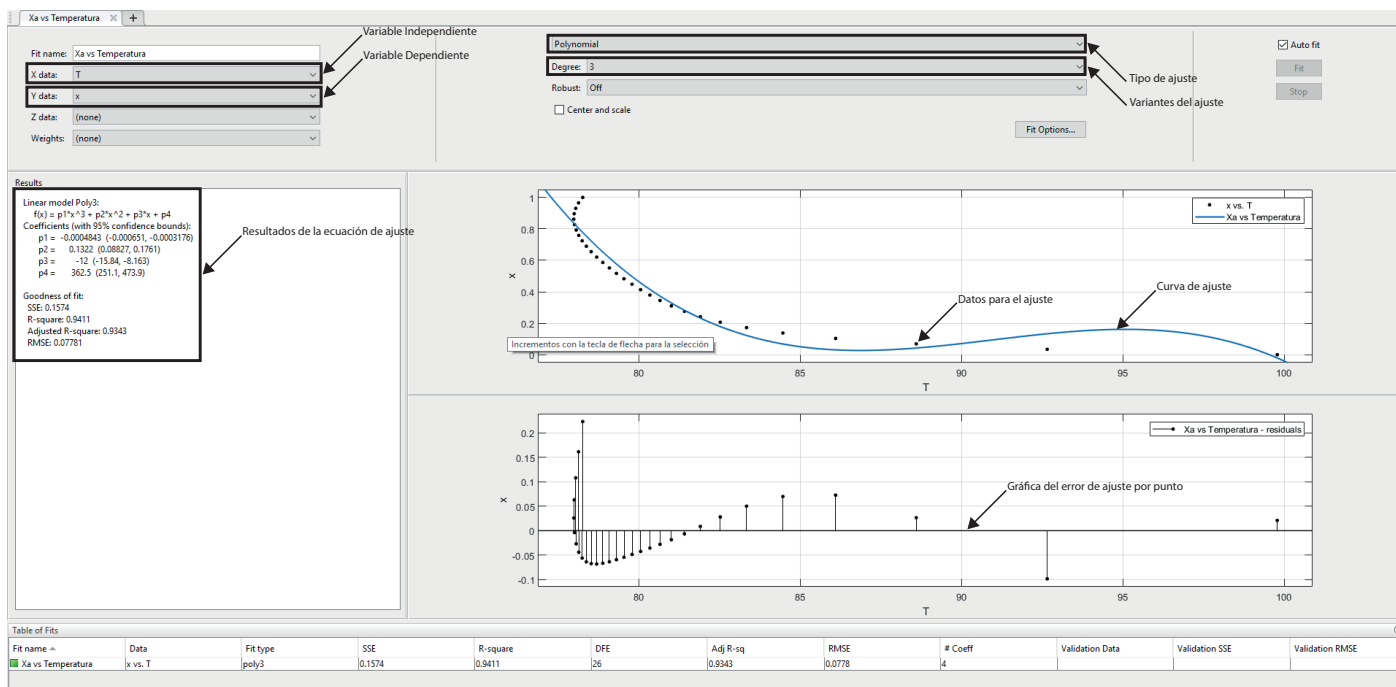


Figura 2.6: Elementos de la interfaz curve fitting de Matlab

En la Figura 2.6 se muestran las partes de la interfaz utilizada donde se resaltan: las variables de entrada, el tipo de ajuste con sus variantes, área de resultados, gráfica de ajuste y gráfica del error de ajuste punto a punto.

## 2.4. Controlador

Como se mencionó en el Capítulo anterior en la sección 1.1.2, en los procesos de destilación donde el cambio de concentración impacta de forma directa en el proceso, se deben atender los criterios discutidos por Ornelas-Martínez & Cabrera-Ruiz (2018) que implican sistemas aislados, respuestas suaves, la eliminación del error en estado estable y resistencia a las imprecisiones. Por otro lado García-Jaimes & Rodríguez-Acevedo (2016) reporta la utilidad del predictor Smith implementado junto

con un controlador PI aplicado a la temperatura en procesos químicos de destilación.

derivado de lo anterior en el presente trabajo se implementó un controlador PI con un predictor Smith bajo el lazo de control mostrado en la Figura 2.7.

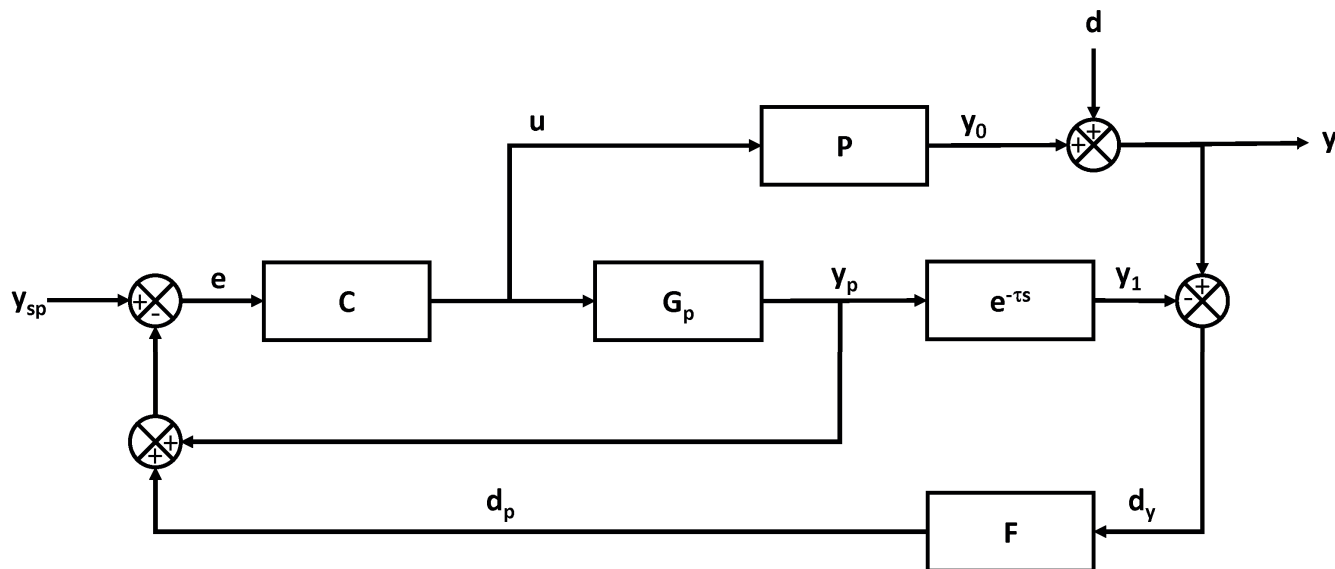


Figura 2.7: Estructura del control PI con predictor Smith (Mathworks 2020)

• Donde los bloques funcionales son:

$C$ : Controlador PI

$G_p$ : Modelo de la planta

$e^{-\tau s}$ : Retardo en la respuesta

$P$ : Planta con el retardo integrado

$F$ : Filtro de primer orden

• Y las señales se definen como:

$y_{sp}$ : Referencia

$y$ : Salida

$u$ : Actuación

$d$ : Perturbaciones externas

$y_0$ : Salida real de la planta

$y_1$ : Predicción de la salida de la planta con retardo

$y_p$ : Predicción de la salida de la planta

$d_y$ : Error entre el predictor y la salida real

$d_p$ : Error filtrado de ruido

$e$ : Error acumulado

De este diagrama se realizó una simulación en Matlab siguiendo los pasos propuestos por Mathworks (2020), utilizando las siguientes características:

**Planta** Sistema térmico de primer orden, que se determinó en una prueba experimental, en donde los parámetros de este son: i) constante de tiempo ( $\tau = 1941,74757281553$ ); ii) ganancia ( $K = 0,987572815533981$ ), cabe mencionar que la constante de tiempo de la función de transferencia es diferente a la citada en el Figura 2.7.



**Retardo** Tiempo muerto que se presenta en el sistema después de introducir referencia ( $\tau = 600$ ).

**Controlador** Controlador sintonizado mediante el algoritmo de ajuste PID para modelo de planta lineal de Matlab (*pidtune*), que debido al tipo de sistema del presente trabajo se calcula mediante un PI atendiendo a las recomendaciones hechas por Ornelas-Martínez & Cabrera-Ruiz (2018) y García-Jaimes & Rodríguez-Acevedo (2016).

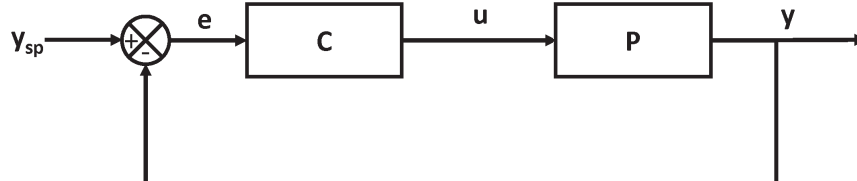


Figura 2.8: Lazo de control realimentado (Mathworks 2020)

La simulación se desarrolló siguiendo la siguiente secuencia:

1. Generar una función de transferencia ( $P$ ) con tiempo muerto acorde a los datos de la planta de estudio.
2. Cálculo su respuesta al escalón unitario de la función de transferencia del paso 1.
3. Sintonizar el controlador PI de la planta del paso 1, con una velocidad de respuesta de 1200 segundos (valor que se propone como prueba del control al ser un sistema lento).
4. Crear un lazo cerrado entre la planta del paso 1 y el controlador calculado en el paso 3, generando un bucle interno como el mostrado en la Figura 2.8 donde la entrada es la referencia ( $Y_{sp}$ ) y la salida es  $y$ .
5. Calcular la respuesta escalón unitario del bucle generado en el paso 4.
6. Generar un filtro pasa bajas ( $F$ ) con entrada  $dy$  y salida  $d_p$ .
7. Renombrar la entrada y la salida de la función de transferencia  $P$  por  $u$  y  $y_0$  respectivamente.
8. Generar la función de transferencia sin retardo ( $G_p$ ), que tiene como entrada  $u$  y salida  $y_p$ .
9. Crear la función  $d_p$  que es un retardo (tiempo muerto), que tiene como entrada  $y_p$  y salida  $y_1$ .
10. Crear un punto suma que tiene como entradas  $y_p$  y  $d_p$  y salida  $y_m$ .
11. Crear un punto suma en sustracción que tiene como entradas  $y_0$  y  $y_1$  y salida  $d_y$ .
12. Realizar las conexiones de los diferentes componentes para obtener el arreglo mostrado en la Figura 2.9.
13. Sintonizar el control PI de la planta generada en el paso 12 mediante un margen de fase de  $90^\circ$  y una velocidad de respuesta de 1200 segundos.

14. Renombrar la entrada y la salida del controlador del paso 13 por  $e$  y  $u$  respectivamente.
15. Crear los puntos suma:  $e = y_{sp} - y_p - d_p$ ,  $y = y_0 + d$  y  $d_y = y - y_1$  acorde a la Figura 2.7.
16. Realizar las conexiones de los componentes de acuerdo a la Figura 2.7 definiendo las entradas  $y_{sp}$  y  $d$  y la salida  $y$ .
17. Calcular la respuesta escalón del modelo con predictor Smith del paso 16 y compararlo con la respuesta del paso 4.

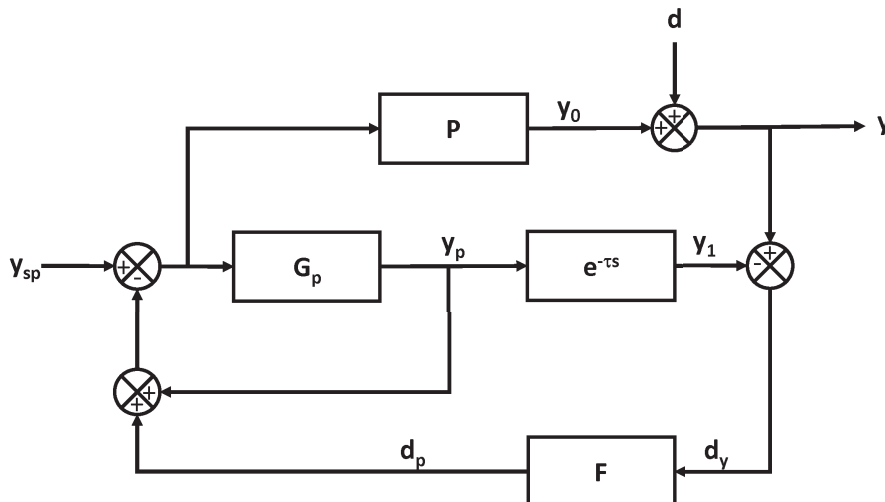


Figura 2.9: Configuración con predictor Smith

El código fuente de este apartado se puede consultar en el Anexo G.

### 2.4.1. Simulación de diversas entradas

Así como es importante conocer la respuesta del sistema ante un escalón, también lo es saber su comportamiento al variar la referencia, para ello se desarrolló un código anexo en el presentado en el apartado anterior, en donde se simula una respuesta escalón y posterior se redefine dicho escalón en otra magnitud; aunado a ello se realizó la simulación del sistema ante una entrada rampa. Partiendo de las estructuras de control del PI y el predictor Smith se tiene la primera simulación:

1. Se define un vector de tiempo con un paso de 1.5 segundos –con un rango 2 horas– en conjunto un vector de referencia escalón de 60°C.
2. Se redefine la referencia a un valor de 90°C con su correspondiente vector de tiempo de la misma duración del otro, partiendo de la idea de que este se redefine 2 horas después.
3. Tanto los vectores de tiempo como los de referencia se unen en vectores correspondientes obteniendo uno para el tiempo y otro para la referencia respectivamente.

4. Se aplica la simulación con el comando lsim donde se introducen como parámetros de entrada: i) el modelo con el predictor Smith, ii) el vector de referencia y iii) el vector de tiempo. De donde se obtienen los vectores de respuesta y tiempo de la simulación.
5. Se grafica la respuesta obtenida.
6. Se repiten los pasos 4 y 5 pero ahora con la estructura del control PI.

Para la segunda simulación se parte de las mismas estructuras que la anterior y se realiza lo siguiente:

1. Se definen las siguientes variables para la rampa: i) tiempo inicial ( $t_0$ , a los 15 minutos de la simulación), ii) tiempo final ( $t_f$ , atendiendo a una duración de 2 horas), iii) valor inicial ( $f_0$ , 60°C) y iv) valor final ( $f_2$ , 90°C).
2. Se define un vector de tiempo con duración de 4 horas y una función de referida a trozos como la mostrada en la ecuación 2.3:

$$f = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{f_2 - f_0}{t_f - t_0} (t - t_0) + f_0 & t_0 \leq t \leq t_f \\ 90 & t \leq t_f \end{cases} \quad (2.3)$$

3. Se aplica la simulación con el comando lsim donde se introducen como parámetros de entrada: i) el modelo con el predictor Smith, ii) el vector de referencia y iii) el vector de tiempo. De donde se obtienen los vectores de respuesta y tiempo de la simulación.
4. Se grafica la respuesta obtenida.

El código del presente apartado se puede consultar en el anexo H.



# Capítulo 3

## 3.1. Fabricación de la planta

A partir del modelo 3D desarrollado se fabricó una planta piloto que consta de los elementos enlistados en la sección 2.2. Se desarrollaron las piezas mostradas en la Figura 3.1 que muestra el casco, tapa del evaporador, cuerpo del destilador de platos y el cierre de este último, así como la bancada, los cuales fueron fabricados de acuerdo a las medidas mostradas en los planos presentes en el anexo A, el material de construcción fue lámina galvanizada calibre 20. En el caso del casco, la tapa del evaporador, y la bancada se les integró un engargolado de 5mm en los perfiles indicados para darle mayor rigidez a cada cuerpo.

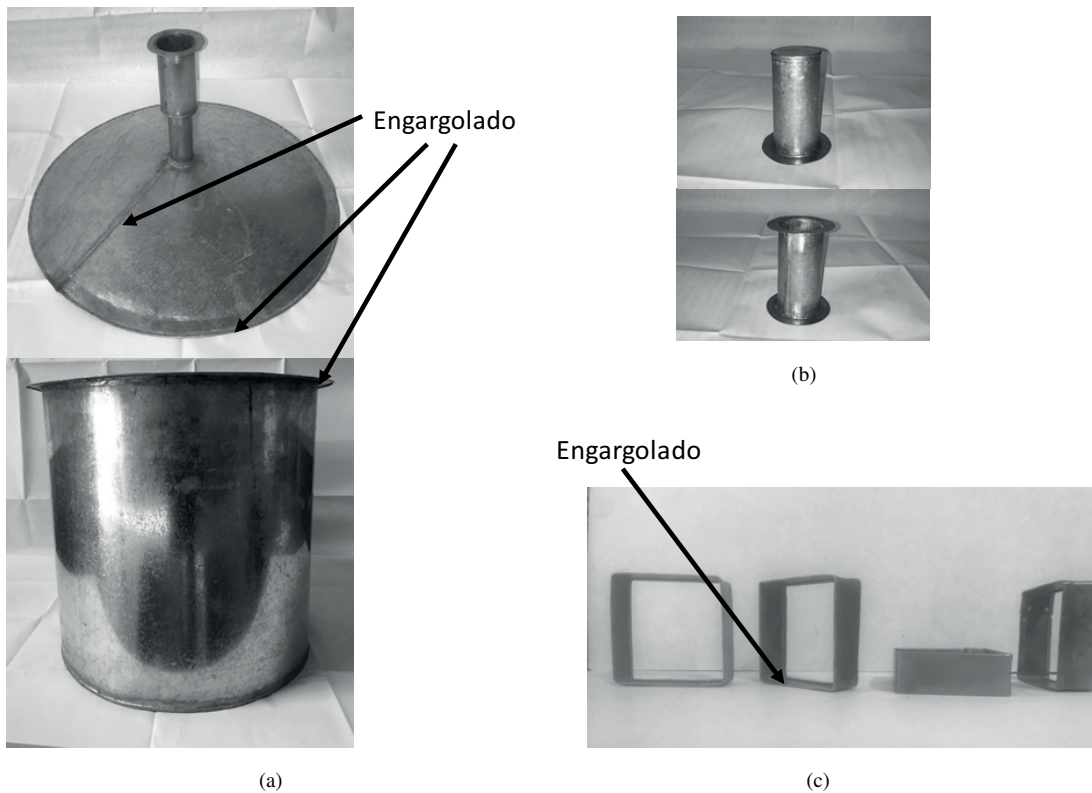


Figura 3.1: (a) Casco y tapa del evaporador; (b) Cuerpo y cierre del destilador de platos; (c) Bancadas

En la Figura 3.2 se muestran las piezas del conjunto de soporte del motor compuestas por: la base del motor, poste fijo, poste móvil, motor nema y tornillo de sujeción, de los cuales la base del motor fue fabricada por impresión 3D con material de aporte PLA en filamento de 1.75 mm, mientras que los postes fijos y móviles fueron maquinados en aluminio 1060.

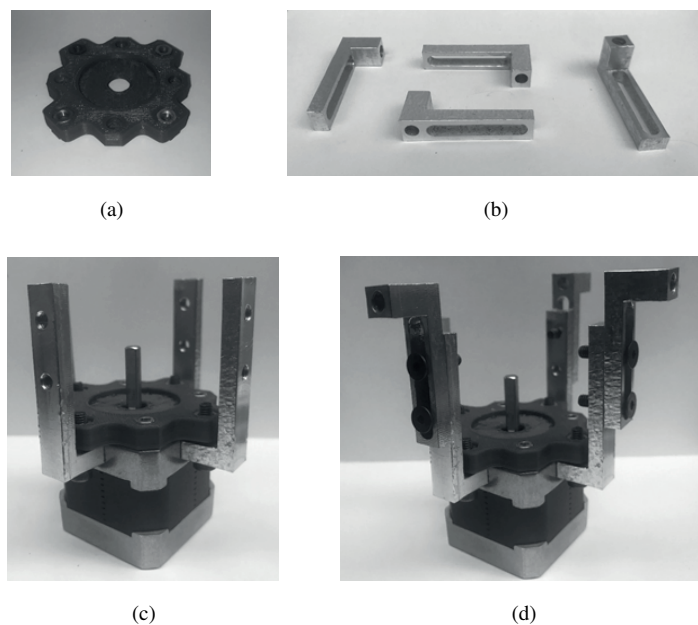


Figura 3.2: (a) Base del motor (fabricación: impresión 3D); (b) Postes fijos y móviles (fabricación: maquinado); (c) Prensamblado: motor-base-postes fijos ;(d) Prensamblado: motor-base-postes fijos- postes móviles

Los conectores del motor y la propela fueron fabricados en impresión 3D utilizando PLA como material de aporte con filamento de 1.75mm. El conector de la propela se le acopló un cople rígido para el ensamble como se muestra en la Figura 3.3 (a) y (c), mientras que los incisos (d) y (e) muestran el conjunto de soporte del motor, y el acoplamiento de este con la propela.

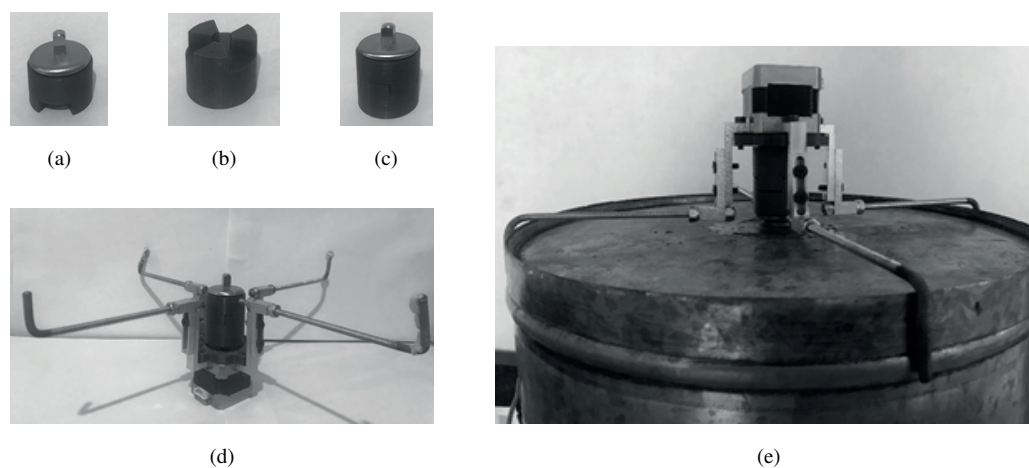


Figura 3.3: (a) Conector de la propela; (b) Conector del motor; (c) Prensamblado: de los conectores de la propela y el motor; (d) Prensamblado: conjunto de soporte del motor, (e) Acoplamiento conjunto de soporte del motor-propela-recinto

Con la fabricación e integración de los elementos discutidos en este apartado así como los planos presentes en el anexo A se obtuvo una planta piloto para destilación de 30 litros de etanol.

### 3.2. Análisis de la planta

A partir de los métodos utilizados en el apartado 2.3 aplicado a la planta piloto se obtuvieron: la función de transferencia con retardo del sistema, la curva de separación de la mezcla etanol-agua y el modelo de concentración respecto a la fracción molar de etanol.

#### 3.2.1. Identificación

Se ha obtenido una función de transferencia a partir de la prueba realizada (siguiendo los pasos descrito en la sección 2.3.1), utilizando un total de 5013 datos y un tiempo de muestreo de 1.5 segundos, dando una referencia de 100°C, como se muestra en la Figura 3.4.

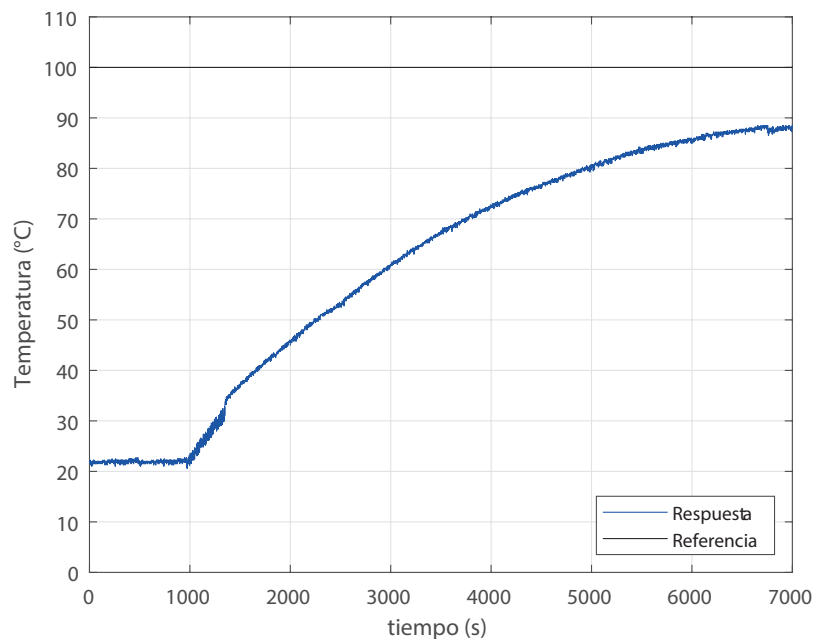


Figura 3.4: Gráfica de los datos muestreados en la prueba de identificación

De la gráfica anterior se observan dos comportamientos: i) retardo conocido como tiempo muerto y ii) la respuesta transitoria del sistema. Con estos datos se realizó la identificación de la planta con el toolbox Ident de Matlab, teniendo un tiempo de muestreo de 1.5 segundos y utilizando una estimación tipo modelo de procesos donde se configuró la identificación de la planta con un polo y un retardo. El resultado de esta identificación se muestra en la Figura 3.5, siendo la gráfica ajuste 1 la generada de forma automática por la aplicación de Matlab en donde se puede observar que el tiempo muerto no coincide con el comportamiento de la planta, por tanto, se realizó un ajuste en el intervalo de la estimación en la variable Td dejándola en un rango de 0 a 1000 lo que genera la aproximación mostrada en la gráfica ajuste 2 mostrado en la misma figura.

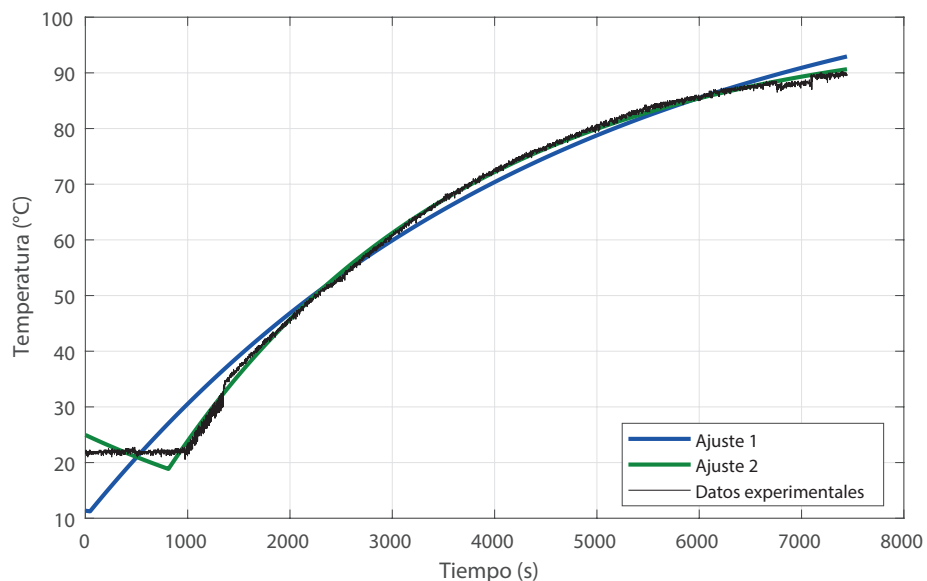


Figura 3.5: Resultados de la identificación por modelo de procesos

El porcentaje de ajuste de las gráficas anteriores es del 87.32% y 96.06% correspondientes al primer y segundo ajuste, esto también se puede observar en la Figura 3.6.

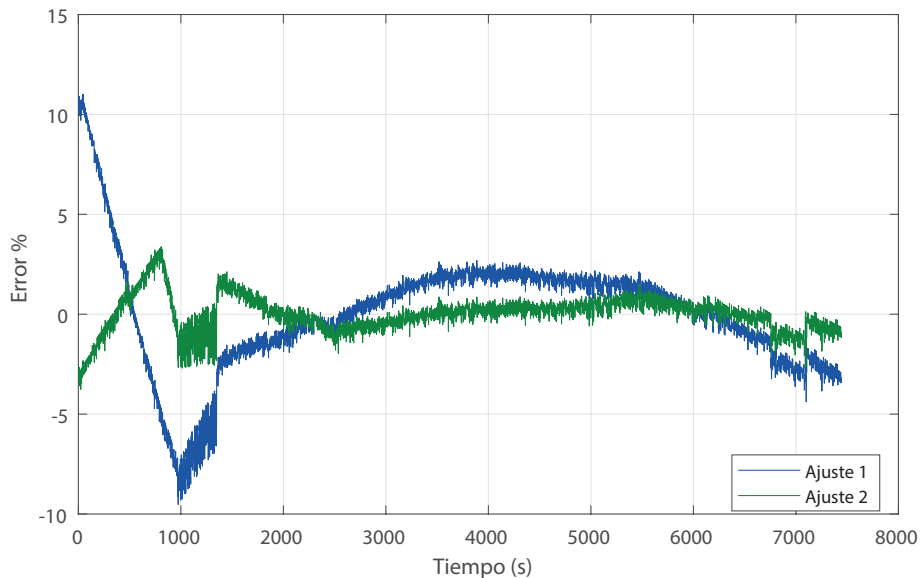


Figura 3.6: Error porcentual de la estimación de la función de transferencia

Con la finalidad de comprobar la efectividad del ajuste se realizó un tercer ajuste utilizando un tiempo de muestreo de 1.5 segundos y la estimación tipo modelo de función de transferencia con un polo y ningún cero, el resultado de dicho ajuste se presenta en la Figura 3.7 teniendo un porcentaje de estimación de 87.27%.



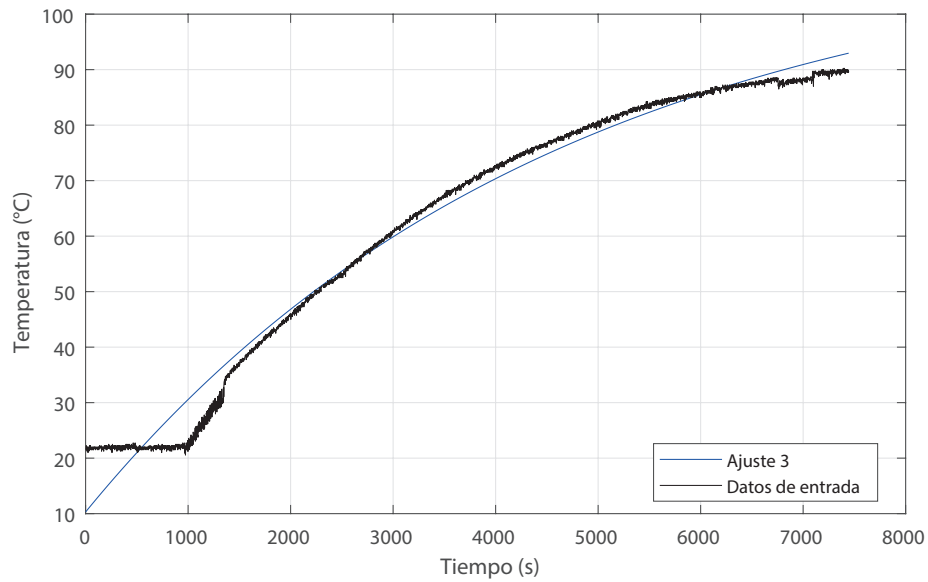


Figura 3.7: Resultado de la identificación por modelo de función de transferencia

En la Tabla 3.1 se muestran los valores obtenidos para la función de transferencia resultado de las tres identificaciones.

Tabla 3.1: Valores del proceso de identificación

Identificación	Ecuación	Variables			Grado de ajuste (%)
		$K_p$	$T_p$	$T_d$	
1	$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} * e^{-T_d*s}$	1.1272	4523.80	45	87.32
2	$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} * e^{-T_d*s}$	0.98727	2893.30	811.11	96.06
3	$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s}$	1.1294	4547.20	0	87.27

En la tabla anterior se observa que los valores de las identificaciones realizadas en donde la identificación 2 tiene un ajuste del 96.06%, siendo este el más alto de las tres. Obteniéndose un modelo de la planta aplicable para los procesos de control subsecuentes.

### 3.2.2. Perfil binario etanol-agua

Atendiendo al proceso descrito en el apartado 2.3.2 se obtuvo en el programa ChemSep la curva de fracción molar vs temperatura de la mezcla etanol agua, la cual se muestra en la Figura 3.8.

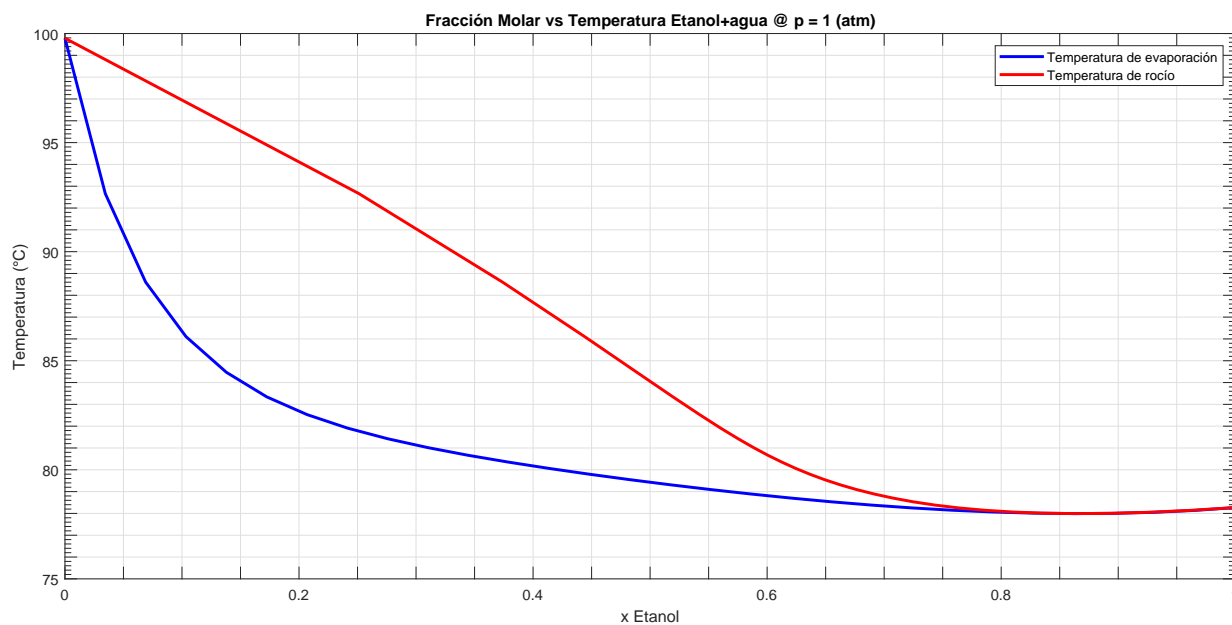


Figura 3.8: Gráfica de temperatura de evaporación y de rocío de la mezcla etanol-agua

La gráfica anterior muestra las temperaturas a las cuales se dan las concentraciones en fracción molar del etanol, en la evaporación y en la condensación, siendo punto de estudio del presente trabajo la temperatura de evaporación.

#### 3.2.2.1. Análisis de la temperatura

Partiendo de los datos generados en el apartado anterior se realizó un análisis del tiempo de calentamiento de acuerdo a los gradientes de temperatura obtenidos de la simulación en ChemSep, para este análisis se utilizó el código presente en el anexo D, del cual se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 3.9.

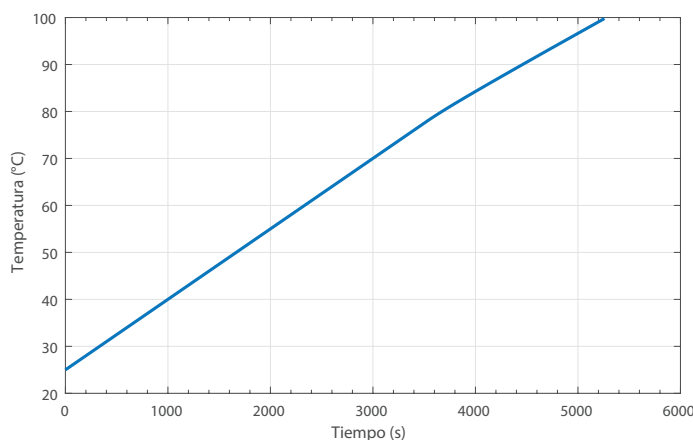


Figura 3.9: Curva de calentamiento de la mezcla etanol-agua

En la gráfica de la Figura 3.9 se encuentra un cambio de tendencia del cual se ha hecho un acercamiento la Figura 3.10.

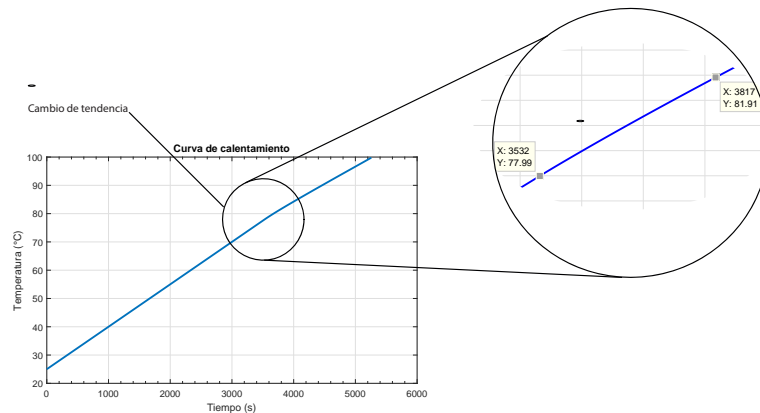


Figura 3.10: Delimitación del cambio de fase en la curva de calentamiento de la mezcla etanol-agua

El punto de inflexión marcado en la Figura 3.10 está en el intervalo de 77.99°C a 81.91°C. Dicha alteración implica un cambio de fase en la mezcla etanol-agua.

### 3.2.2.2. Análisis de la densidad

Como se comentó en los párrafos anteriores, al cambiar la temperatura también lo hace la concentración y en consecuencia la densidad, por lo que fue necesario determinar dicha alteración. Basándose en los datos reportados por Cerquera & Acosta (2016) y Pérez-Ones et al. (2010) concentrados en la Tabla 2.1 se realizó el ajuste de curvas mostrado en la Figura 3.11, el cual tiene un índice de correlación de 0.9986.

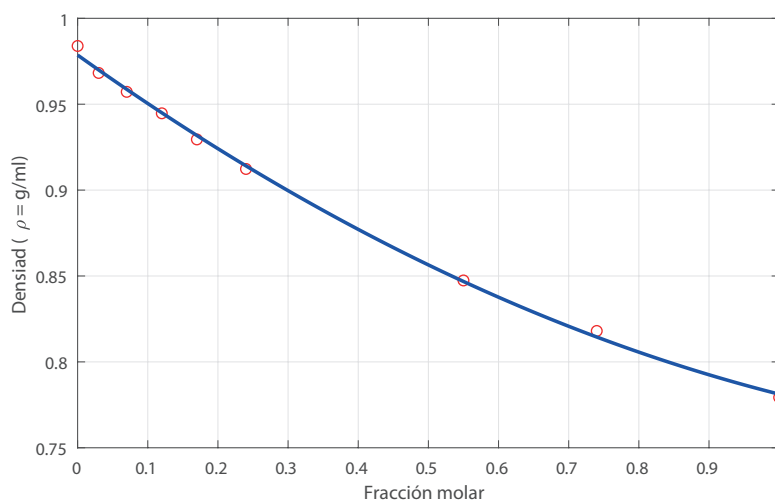


Figura 3.11: Ajuste de curva de densidad vs fracción molar

El ajuste de la curva anterior se realizó en Excel y dio como resultado la ecuación 3.1 mostrada a continuación.

$$\rho = 0,0938X_a^2 - 0,2912X_a + 0,9786 \quad (3.1)$$

donde:

- $\rho$  = Densidad de la mezcla (g/ml).
- $X_a$  = Fracción molar.

Conociendo las fracciones molares de la mezcla etanol-agua se desarrolló el programa mostrado en el anexo E, que calcula la densidad correspondiente a cada una de las muestras obtenidas de la simulación del programa ChemSep, dando como resultado la gráfica mostrada a continuación.

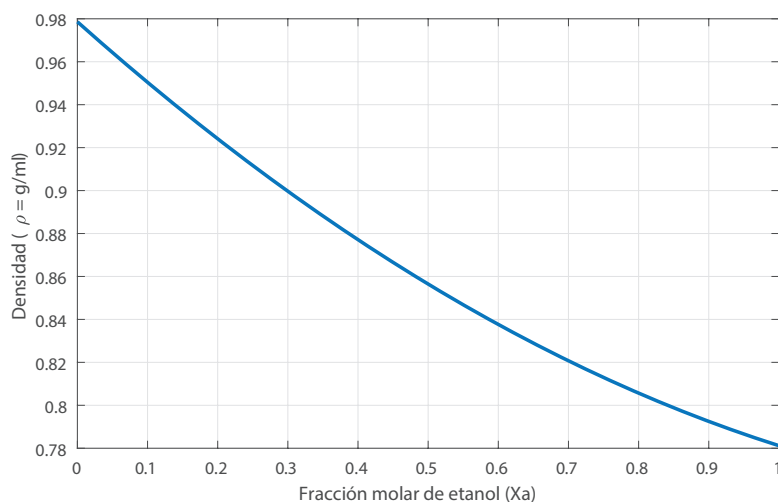


Figura 3.12: Cálculo de la densidad de la mezcla etanol-agua

De la Figura 3.12 se observa que al aumentar la fracción molar disminuye la densidad, de acuerdo a la ecuación 3.1.

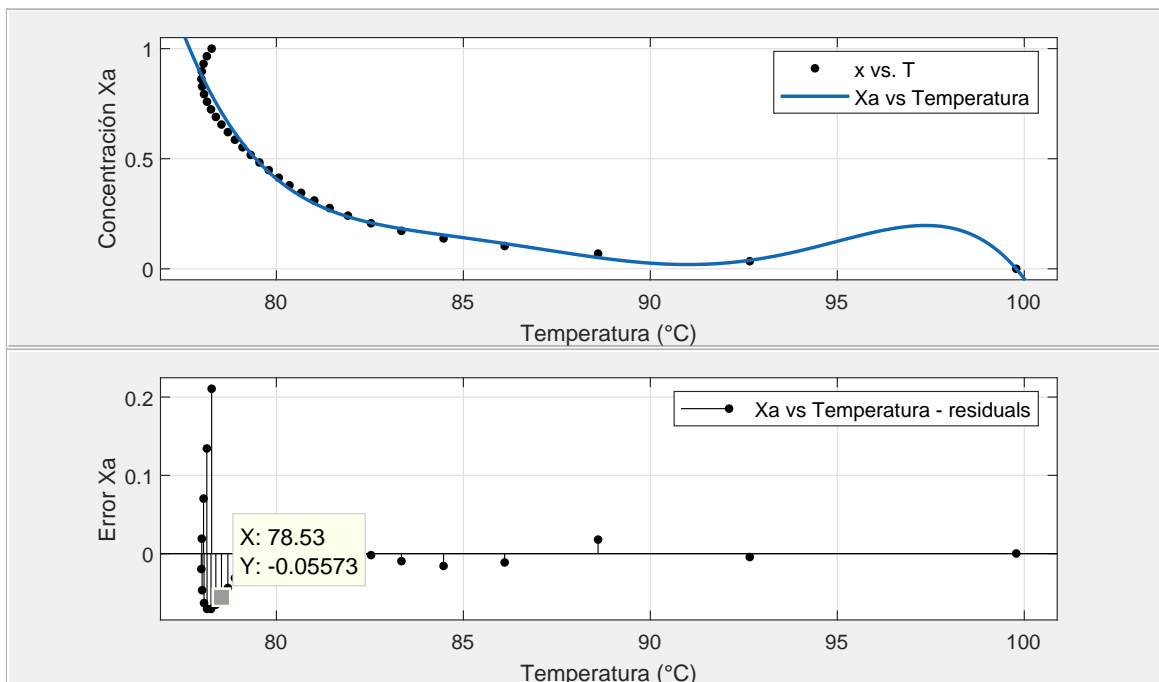
### 3.2.2.3. Análisis de temperatura vs concentración

Aunado al análisis realizado en el apartado anterior, se realizó el ajuste de la curva de concentración vs temperatura de evaporación siguiendo la metodología descrita en el tema 2.3.3 de donde se determinaron tres ajustes que cumplen con los criterios mencionados en dicha metodología, las características de estas curvas se registran en la Tabla 3.2.

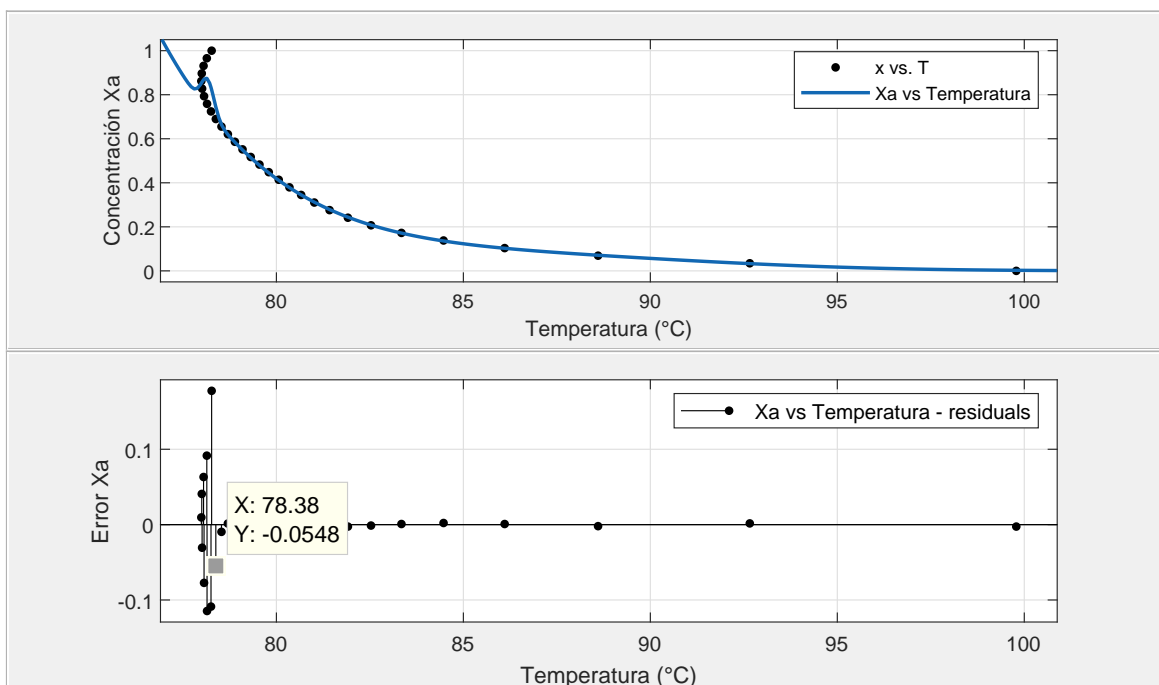
Tabla 3.2: Resumen del ajuste de la curva temperatura de evaporación vs concentración

No.	Tipo de ajuste	Grado	Ecuación	Constantes de la ecuación	Ajuste (%)	Observaciones
1	Polinomial	5	$f(x) = p1 * x^5 + p2 * x^4 + p3 * x^3 + p4 * x^2 + p5 * x + p6$	$p1 = -6,97 * 10^{-06}$ $p2 = 0,0031$ $p3 = -0,5509$ $p4 = 48,89$ $p5 = -2167$ $p6 = 3,838 * 10^{04}$	95	Extremo derecho: dos puntos de inflexión Extremo izquierdo: desajuste respecto a los datos (21.16%)
2	Gaussiano	3	$X_a = a1 * e^{-\left(\frac{T-b1}{c1}\right)^2} + a2 * e^{-\left(\frac{T-b2}{c2}\right)^2} + a3 * e^{-\left(\frac{T-b3}{c3}\right)^2}$	$a1 = 0.1425$ $b1 = 78.16$ $c1 = 0.241$ $a2 = 99.07$ $b2 = 47.02$ $c2 = 14.01$ $a3 = 0.06128$ $b3 = 86.38$ $c3 = 7.5$	95	Extremo izquierdo: desajuste respecto a los datos (17.76%)
3	Racional	0/3	$f(x) = \frac{p1}{q1} x^3 + q1 * x^2 + q2 * x + q3$	$q1 = -136.2$ $q2 = 4574$ $q3 = 153$	95	Extremo izquierdo: desajuste respecto a los datos (21.79%)

De la Tabla 3.2 se observa que todos los ajustes salen fuera del rango de significancia (límite permitido del 10% de error); por lo tanto, es necesario analizar el comportamiento de las funciones respecto a los datos, para ello se observó su comportamiento en la Figura 3.13. Atendiendo a lo anotado en la Tabla 3.2 y el comportamiento mostrado en la Figura 3.13 (a) el ajuste polinómico muestra dos puntos de inflexión en los intervalos de temperatura de (88.6, 92.66) y (92.66, 99.79), estos puntos de inflexión cambian las concavidades de la curva, alterando su comportamiento de esta por lo cual la tendencia mostrada de los puntos de ajuste no coincide con el comportamiento de estos cambios en la función, aunado a lo anterior se observa que antes de los 78.53°C el ajuste muestra un comportamiento errático confirmado por el error de  $X_a$ ; de la Figura 3.13 (b) se observa un desajuste en valores menores a 78.38°C; por su parte en la Figura 3.13 (c) se observa que en el lado izquierdo existe un desajuste de la curva antes de 78.53°C.

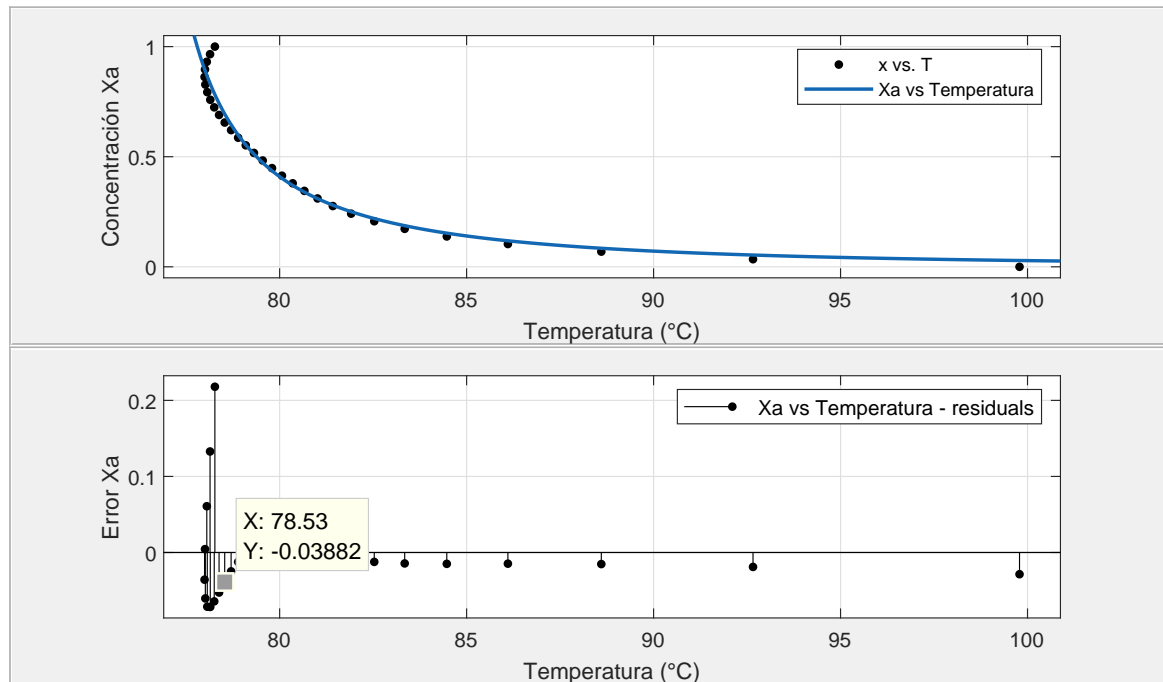


(a)



(b)

Figura 3.13: (Continúa en la siguiente página)



(c)

Figura 3.13: Ajustes de la curva de temperatura de evaporación vs concentración: (a) Ajuste polinomial; (b) Ajuste gaussiano; (c) Ajuste racional

Atendiendo al comportamiento de cada uno de los ajustes se optó por utilizar el ajuste gaussiano debido a que su comportamiento presenta menos variaciones respecto a los puntos de referida utilizados. En otro orden de ideas sin importar la curva utilizada para el ajuste, las tres opciones requieran acotar el dominio para su uso, esto debido al comportamiento divergente que presenta la curva de datos de temperatura vs concentración. En el caso de la curva de ajuste gaussiano el desajuste referido en el párrafo anterior indica que la función no es aplicable antes de dicho valor, así mismo tampoco lo es para valores posteriores a 100°C esto debido a que los valores para el ajuste no sobrepasan este valor. Por lo tanto la ecuación de ajuste aplicable en el presente queda como:

$$X_a = a1 * e^{-\left(\frac{T-b1}{c1}\right)^2} + a2 * e^{-\left(\frac{T-b2}{c2}\right)^2} + a3 * e^{-\left(\frac{T-b3}{c3}\right)^2} \quad 78,38 \leq T \leq 100 \quad (3.2)$$

donde T es la temperatura en °C y  $X_a$  la concentración de evaporación. Cabe mencionar que los valores de las constantes son los reportados en la Tabla 3.2. EL valor de 78.38° representa la temperatura de separación de la mezcla etanol agua y a esta temperatura se tiene una concentración de 0.7422 molar.

### 3.3. Control de temperatura

Una vez conocida la dinámica del sistema y atendiendo a las observaciones hechas por Ornelas-Martínez & Cabrera-Ruiz (2018) se desarrollaron los modelos planteados en la sección 2.4, donde se hizo realizó la simulación entre un controlador PI y la estructura del predictor Smith mostrados en las Figuras 2.8 y 2.7 respectivamente. Dicha simulación se desarrolla en el programa de Matlab mostrado en el apéndice G.

#### 3.3.1. Control PI vs predictor Smith

De la simulación comentada en el apartado anterior se obtiene tres resultados: i) la respuesta escalón del sistema con retardo, ii) la respuesta del sistema con un lazo de control PI y iii) la respuesta del sistema con el lazo de control del predictor Smith.

De la respuesta escalón del sistema con retardo se obtiene el comportamiento mostrado en la Figura 3.14, donde se determina un tiempo de levantamiento de 4266.87 segundos (1.18 horas) y un tiempo de asentamiento de 8196.62 segundos (2.27 horas).

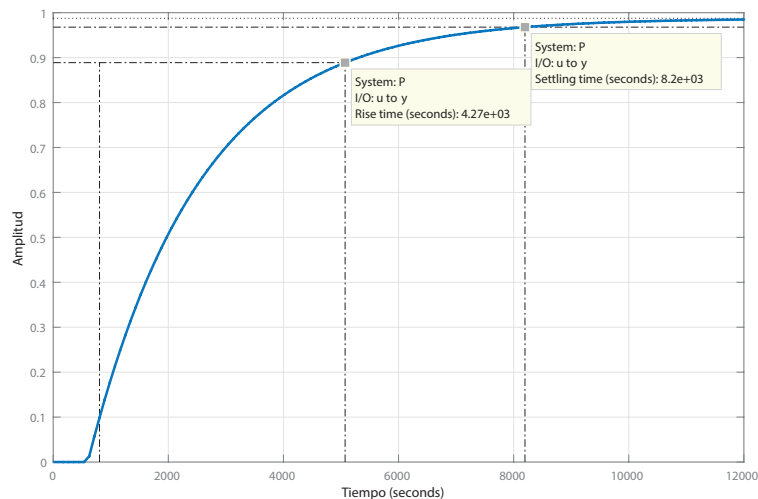


Figura 3.14: Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con retardo

La repuesta del sistema con lazo de control PI se observa en la Figura 3.15, teniendo un tiempo de levantamiento de 1136.05 segundos (0.32 horas), un tiempo de asentamiento de 4098.37 segundos (1.14 horas) y un sobrepaso de 105.54%.



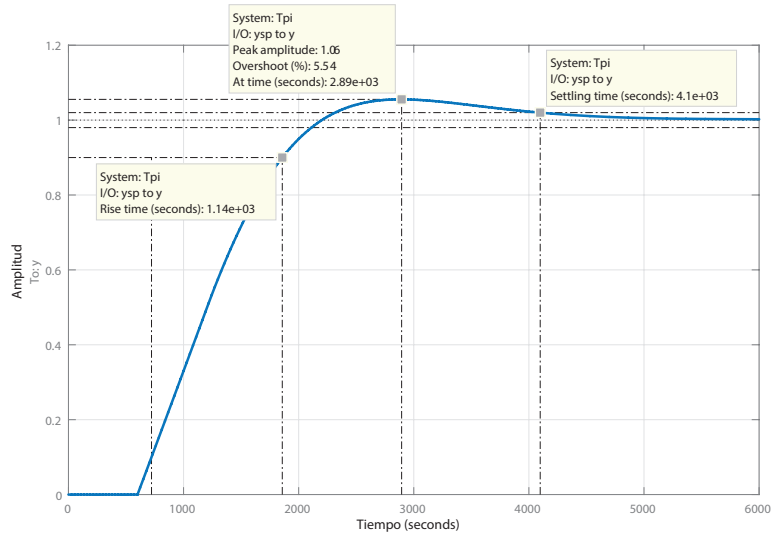


Figura 3.15: Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control PI

Del predictor Smith se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 3.16, donde se obtuvieron los tiempos de: 2623.24 segundos (0.73 horas) y 5240.76 segundos (1.46 horas) correspondiendo al levantamiento y asentamiento respectivamente.

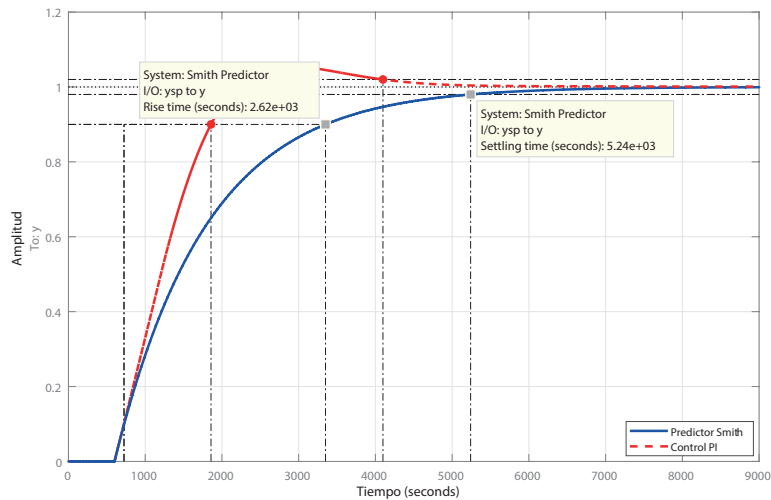


Figura 3.16: Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control del predictor Smith

En la Tabla 3.3 se hace la comparación de las características de la respuesta de los tres sistemas:

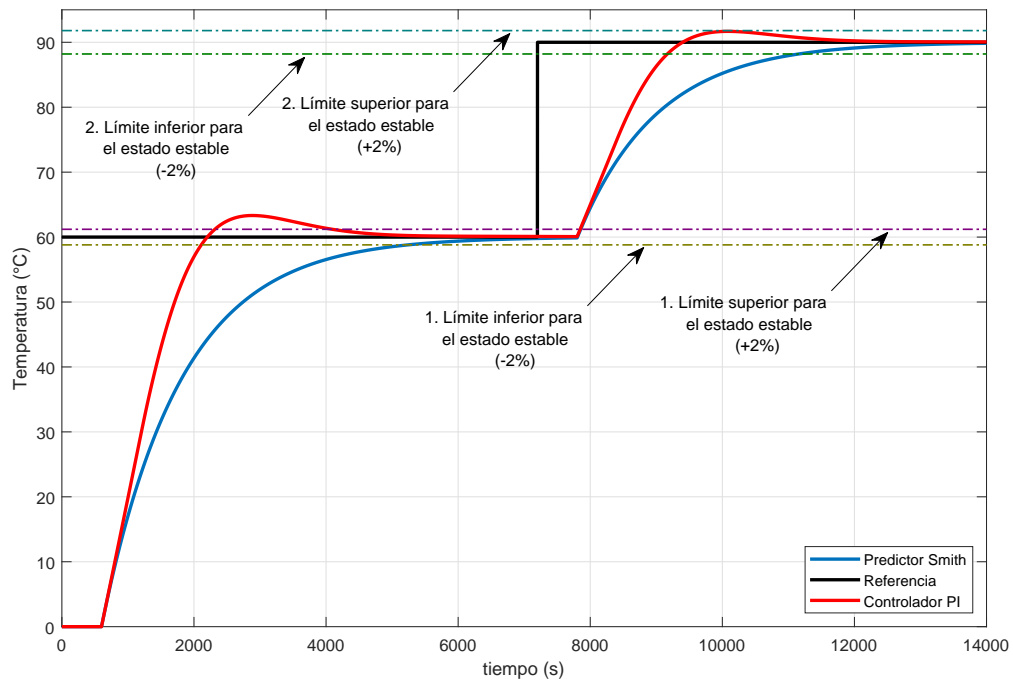
Tabla 3.3: Características de la respuesta de los diferentes sistemas a una referencia escalón unitario

<b>Respuesta escalón</b>	<b>Tiempo de levantamiento (Horas)</b>	<b>Tiempo de asentamiento (Horas)</b>	<b>sobrepaso %</b>
Sistema con retardo	1.18	2.27	0
Sistema con lazo control PI	0.32	1.14	105.54
Sistema con lazo de control predictor Smith	0.73	1.46	0

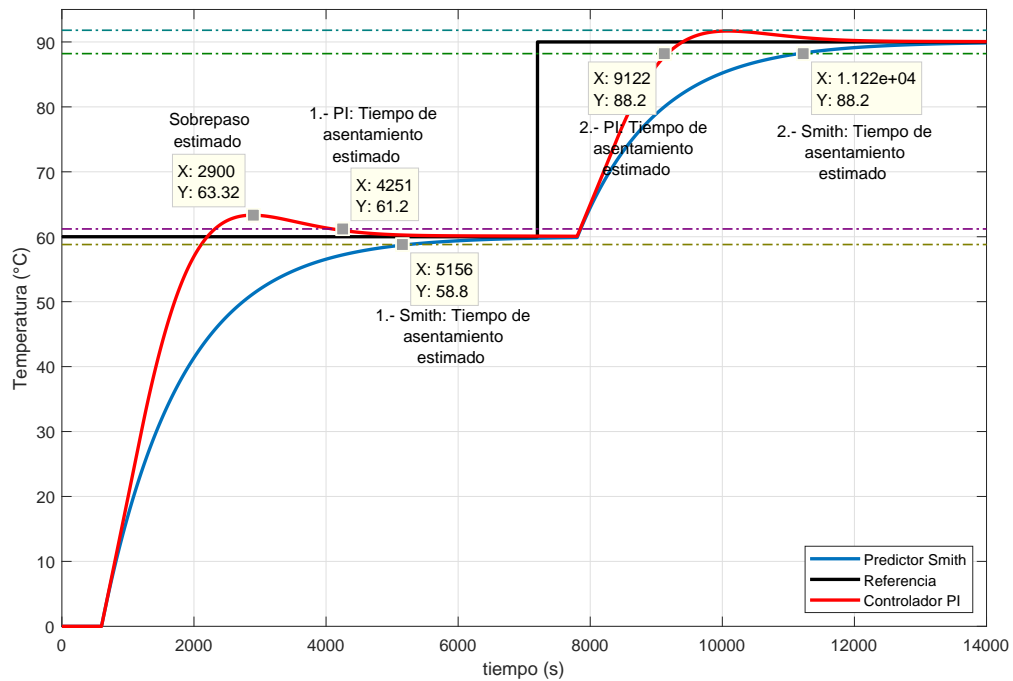
En la tabla anterior se puede observar que el sistema sin ningún controlador tiene un tiempo de levantamiento de 1.18 horas mientras que con el control PI esta respuesta se da a las 0.32 horas, notándose una reducción respecto al comportamiento de la planta en dicho tiempo (0.86 horas menos) lo cual es mayor respecto a la duración de predictor Smith (0.45 horas menos) para el mismo caso. El tiempo de asentamiento muestra un comportamiento similar teniendo una reducción respecto de la planta de 1.13 y 0.81 horas para el controlador PI y el predictor Smith respectivamente. Aunado a ello, se observa que el sobrepaso es inexistente en la respuesta del sistema sin controlador y en el predictor Smith, mientras que en el controlador PI se excede la referencia en un 105.54%, lo cual no es recomendado para sistemas de destilación pues se tiene un valor fuera de los márgenes controlables y se pierde la relación de concentraciones (Ornelas-Martínez & Cabrera-Ruiz 2018).

Ya conociendo las características de las respuestas del controlador PI y el predictor Smith, se realizó un acotamiento atendiendo a posibles escenarios en el proceso de destilación tomando como referencia dos casos: i) que la referencia del sistema de control se cambiase durante el proceso –siendo la primera y la segunda referencia constantes–, ii) La referencia es una variable que cambia respecto del tiempo –en este caso una función rampa–. Las características de éstas excitaciones se describieron en el apartado 2.4.1.

En la Figura 3.17 se observa la respuesta del controlador PI y el predictor bajo las condiciones mencionadas en el caso i) del párrafo anterior. En la Figura 3.17 (a) se muestran los límites para alcanzar el tiempo de establecimiento, que se ponderó en el  $\pm 2\%$  del valor final para cada referencia, así mismo se observa que el comportamiento tanto del controlador PI como del predictor Smith se mantienen respecto al análisis realizado a partir de la Tabla 3.3, donde se muestra un comportamiento subamortiguado para el controlador PI y sobreamortiguado para el predictor Smith; en la Figura 3.17 (b) se estimaron gráficamente los tiempos de asentamiento de los dos escalones, tanto para el controlador PI como para el predictor Smith, dichos valores se concentran en la Tabla 3.4.

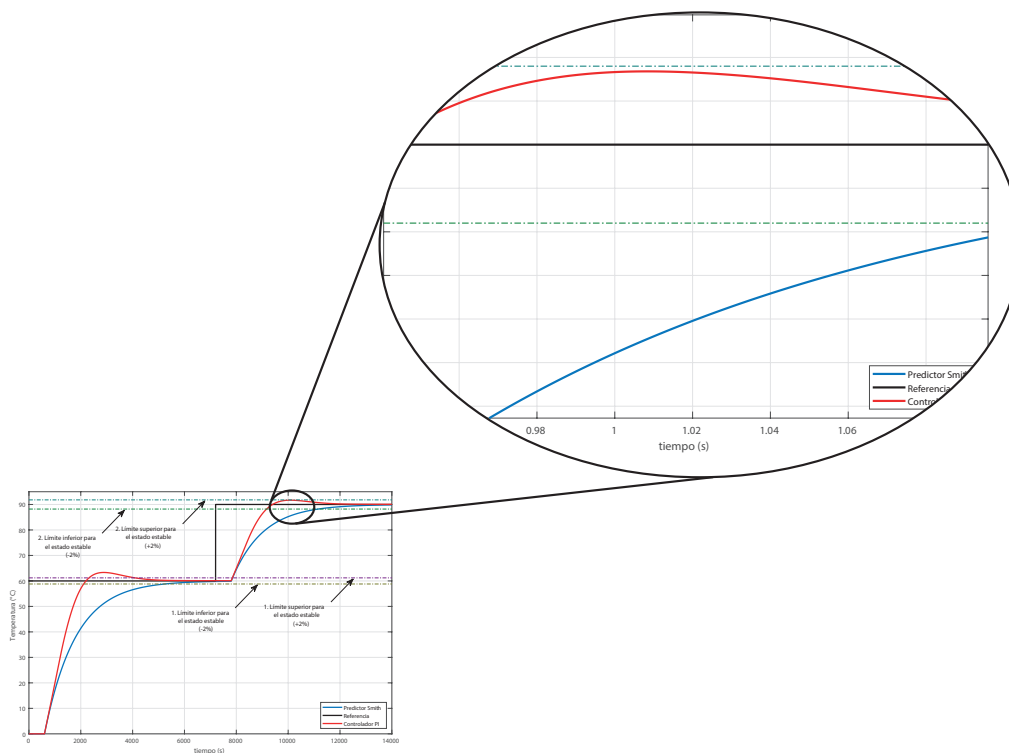


(a)



(b)

Figura 3.17: (Continúa en la siguiente página)



(c)

Figura 3.17: Respuesta del controlador PI y el Predictor Smith ante dos escalones sucesivos no unitarios (a) Límites del estado estable; (b) Tiempos de asentamiento estimados y sobrepasos; (c) valor máximo del controlador (PI)

En la Figura 3.4 (c) se observa una ampliación del comportamiento del controlador PI y el predictor Smith ante el segundo escalón, donde si bien existe un sobrepaso en la respuesta del controlador este no excede el 2% por lo cual se considera su tiempo de asentamiento cuando cruza el límite inferior del estado estable establecido para el escalón en cuestión.

Tabla 3.4: Respuesta de la implementación del controlador PI y el predictor Smith ante dos escalones no unitarios

Sistema	Tiempo de asentamiento (Horas)		Sobrepaso (%)		Tiempo transcurrido cambiada la referencia
	1er escalón	2ndo escalón	1er escalón	2ndo escalón	
	lazo de control PI	1.18	2.53	105.5	
lazo de control del predictor Smith	1.42	3.11	0	0	1.11

En la tabla 3.4 se pueden observar que los tiempos de asentamiento del controlador PI menores respecto al predictor, pero a su vez el primero muestra sobrepulsos antes de llegar a su valor final en cada caso, recordando que es este comporta-

miento no es ideal para sistemas de destilación debido a su duración y a los límites de temperatura referentes a la curva de concentraciones mostrada en la Figura 3.8.

Atendiendo al caso ii) para la simulación se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3.18, en donde se observa el comportamiento tanto de controlador PI como del predictor Smith. El controlador nuevamente muestra un tiempo de respuesta más rápido respecto al predictor, sin embargo, muestra oscilaciones durante el levantamiento de la respuesta, consistente con los resultados anteriores. Por otra parte, el predictor continúa manteniendo su comportamiento sobreamortiguado.

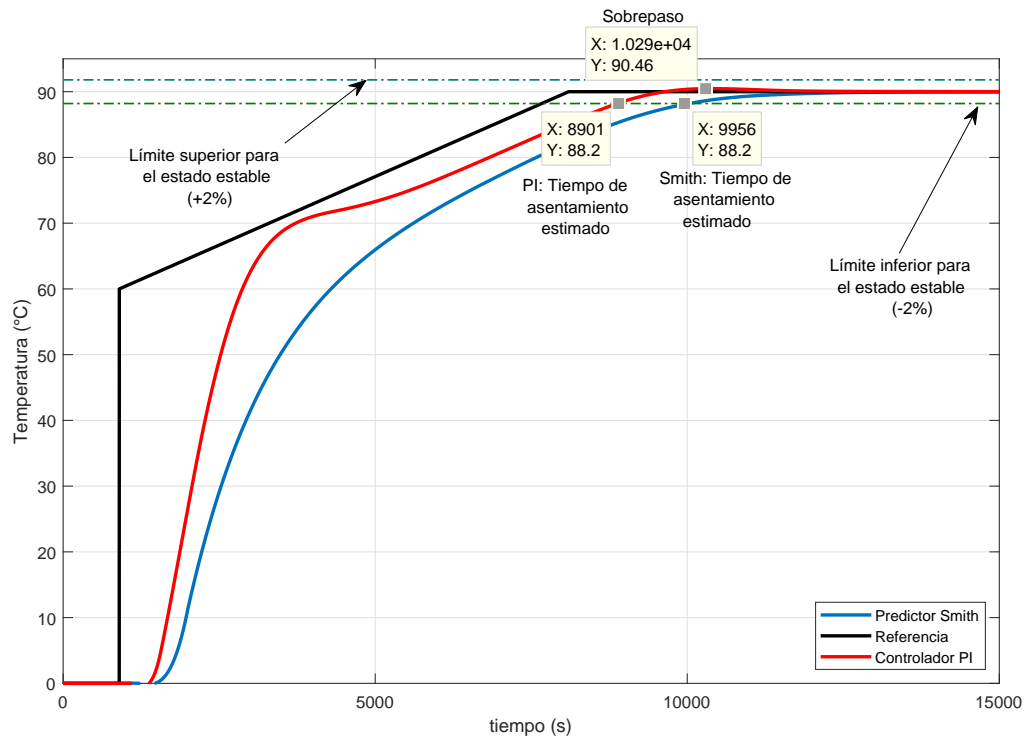


Figura 3.18: Resultado de la respuesta escalón unitario del sistema con el lazo de control del predictor Smith

En la Tabla 3.5 se muestran los valores de la simulación de la Figura 3.18 en donde el sobrepaso del controlador PI se encuentra en los límites para el estado estable. En el mismo tenor se observa que el predictor Smith no tiene sobrepaso. Respecto al tiempo de asentamiento la diferencia de tiempo es de 0.3 horas siendo el predictor el más lento.

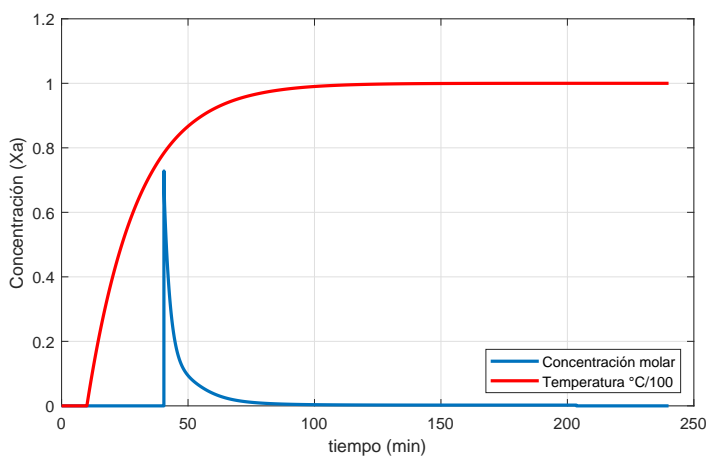
Tabla 3.5: Respuesta de sistema a una entrada rampa

Sistema	Tiempo asentamiento (Horas)	Sobrepaso (%)
lazo de control PI	2.47	90.46
lazo de control del predictor Smith	2.77	0

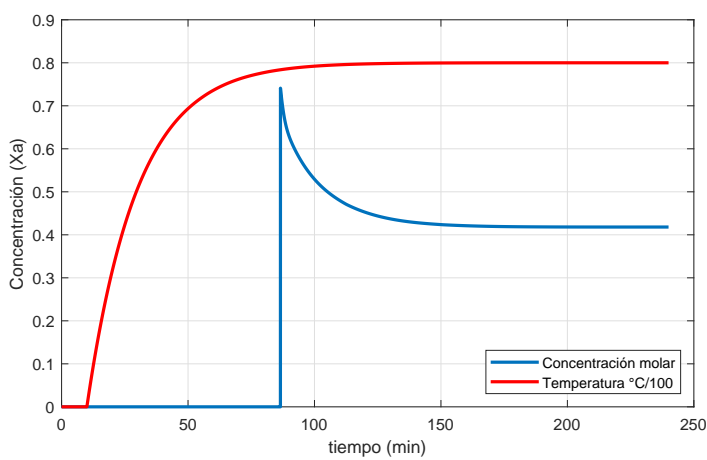
Atendiendo a los resultados de las simulaciones se concluye que el comportamiento del controlador tiene tendencias manifestar sobreimpulsos y aun cuando estos son parte de la respuesta transitoria su duración es significativa para procesos de destilación. Por otro lado, el predictor muestra respuestas sobreamortiguadas y aunque su tiempo de asentamiento es mayor respecto a su contraparte se muestra más propicio para los procesos en estudio.

### 3.3.2. Efecto del control de temperatura en la concentración

Una vez conocido el comportamiento de la planta es posible obtener la relación entre la temperatura del sistema y la concentración de la mezcla, partiendo de la ecuación 3.2 se obtiene el comportamiento simulado en el programa contenido en el anexo I. En este programa se simula la respuesta ante una referencia del  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  y a  $78.38^{\circ}\text{C}$  (temperatura de separación), de lo cual se obtienen las respuestas mostradas en la Figura 3.19 cabe mencionar que para fines comparativos se escaló la respuesta a un valor de  $1/100$  ya que la concentración de la mezcla tiene un contradominio de  $(0,1)$ .

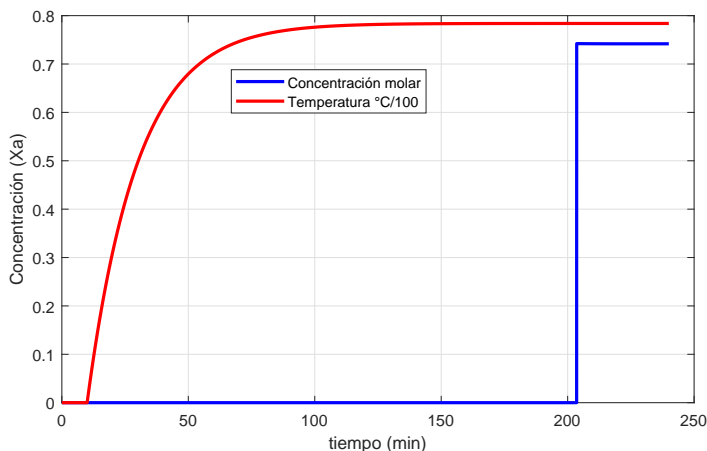


(a)



(b)

Figura 3.19: (Continúa en la siguiente página)



(c)

Figura 3.19: Respuesta del sistema y comportamiento de la concentración de etanol en la mezcla

(a) Simulación a 100°C; (b) Simulación a 80°C; (c) Simulación a 78.38°C (temperatura de separación)

De la Figura 3.19 (a) se observa que para una referencia de 100°C la concentración disminuye rápidamente a cero mostrando un pico a los 78.38°C; bajo el mismo tenor ante una referencia de 80°C (Figura 3.19 (b)) se manifiesta nuevamente un valor máximo de concentración a los 78.38°C seguido de una disminución de esta hasta un valor de 0.4182; por último en la Figura 3.19 (c) se observa que al llegar a temperatura de separación (78.38°C) la concentración crece súbitamente y se mantiene con un valor de concentración de 0.7422. Este comportamiento se confirma al observar la curva de concentración vs temperatura de evaporación y rocío mostrada en la Figura 3.8, en donde a 100°C la concentración de etanol es mínima y es de 0.7422 a los 78.38°C aproximadamente.

### 3.4. Comparación

Ya teniendo el comportamiento en la planta se realizó la comparación de los resultados obtenidos respecto a los trabajos de Pérez-Núñez et al. (2018) y Fernández-Hernández (2013). En donde el primero realizó la implementación de un controlador PI en un destilador de etanol donde la respuesta de su sistema se muestra en la Figura 3.20 (b) que presenta una respuesta de primer grado con un comportamiento atípico, aunado a un error en estado estable de 18°C aproximadamente.

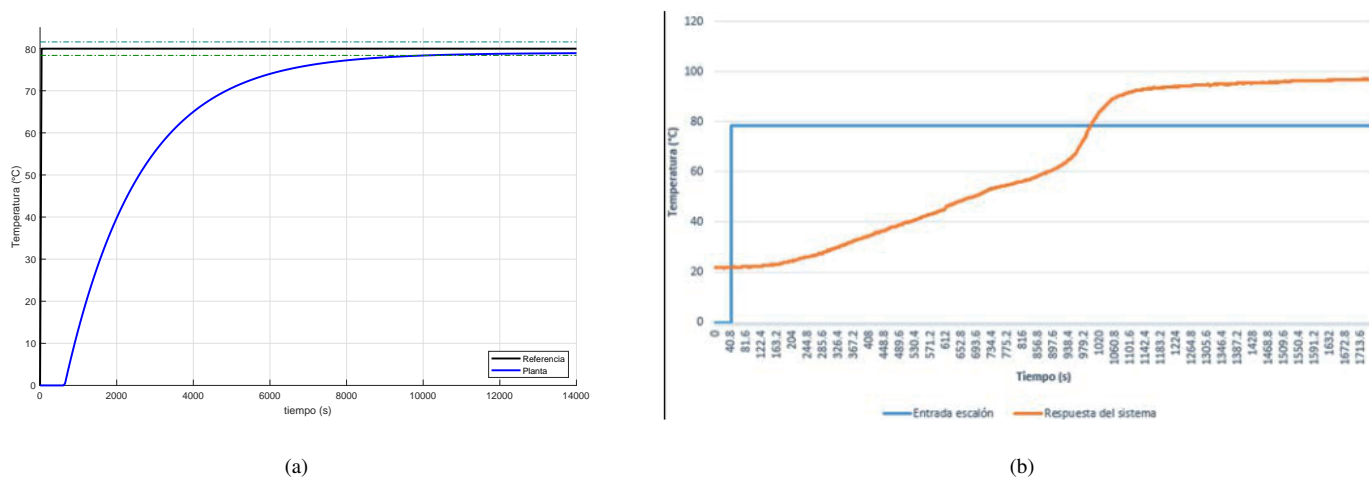


Figura 3.20: Respuesta de la planta (a) Plata desarrollada en el presente trabajo (b) Planta desarrollada por Pérez-Nuñez et al. (2018)

Por otra parte en la Figura 3.21 se muestra la respuesta al implementar un controlador PI con una referencia de 80°C. en el inciso (b) de la figura se observa que el error en estado estable se ha corregido así mismos la planta conserva el comportamiento atípico mencionado en el párrafo anterior.

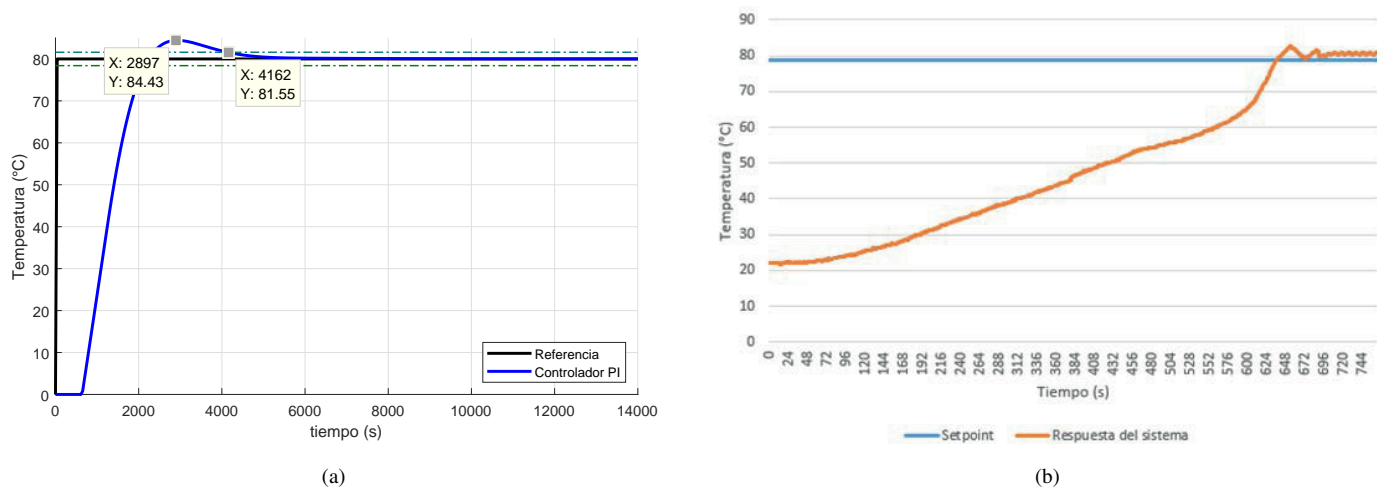


Figura 3.21: Respuesta del controlador PI: (a) Desarrollada en el presente trabajo (b) Desarrollada por Pérez-Nuñez et al. (2018)

En la Tabla 3.6 se hace un resumen del comportamiento de los dos sistemas comparados partiendo de las características de la planta y del controlador PI. Donde en la planta de Pérez-Nuñez et al. (2018) se realizaron las pruebas con una mezcla de etanol-agua al 20% mientras que la reportada en este trabajo se realizó únicamente con agua. En el controlador la constante proporcional reportada por Pérez-Nuñez et al. (2018) tiene un valor considerablemente grande respecto a la desarrollada en el presente trabajo, esto debido a que el error en estado estable de la planta de en el primero es de 18°C por lo que se requiere una compensación mayor en el controlador.

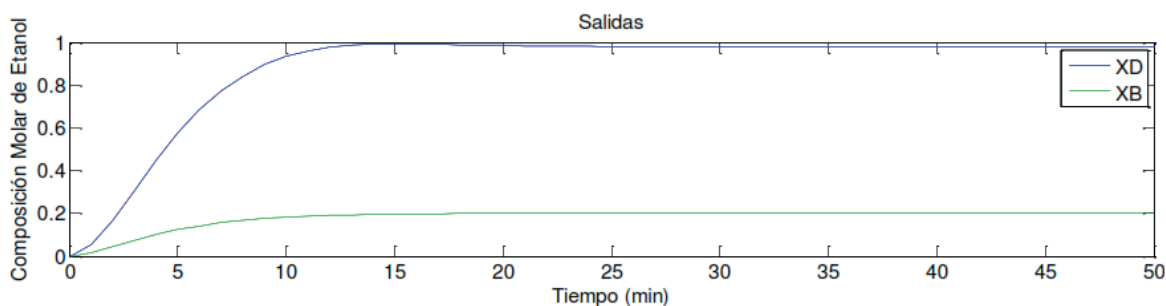


Tabla 3.6: Comparación de resultados con Pérez-Núñez et al. (2018)

Prueba	Variable de desempeño	Olguin-Camacho, J.	Pérez-Núñez, F. J.	Observaciones
Respuesta al escalón de la planta	Comportamiento de la planta	Primer Orden con retardo	Primer orden con comportamientos atípicos	
	Valor de inicio	0°C	21°C	
	Tiempo del primer cruce con la referencia	No cruza se estabiliza	0.28 Hrs.	Referencia 80°C
	Valor de asentamiento	78.93 °C	98°C aprox.	Fluido de prueba:
	Tiempo de asentamiento	2.81 Hrs.	4.9 Hrs.	Agua vs Etanol-Agua (20%)
	Error en estado estable	1.06°C	18 °C aprox.	
	Kp	1.61	666	
Controlador PI	Ki	1840	0.2365	
	Sobreimpulso	84.42	82 aprox.	
	Tiempo de asentamiento	1.16 Hrs.	0.19 Hrs.	

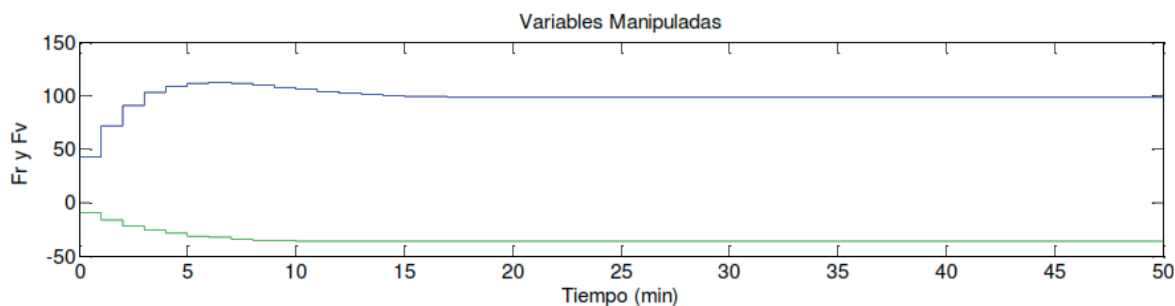
Del análisis de realizado en los párrafos anteriores se observa un comportamiento similar en las dos plantas debido a que ambas presentan una respuesta de primer orden y al implementar el controlador se manifiesta un sobrepasos. Cabe mencionar que la velocidad de respuesta en los trabajos difieren, esto es debido a las cantidades de mezcla de cada prueba.

Respecto al trabajo reportado por Fernández-Hernández (2013) se observa la respuesta de un proceso de destilación de etanol ante una referencia un escalón de 100°C aplicando un modelo de control predictivo (MPC) la cual se muestra en la Figura 3.22.



(a)

Figura 3.22: Continúa en la siguiente página



(b)

Figura 3.22: Simulación de un sistema de destilación de ante a un escalón de 100°C (Fernández-Hernández 2013):

(a) Comportamiento de la concentración molar del etanol a lo largo de la simulación; (b) Comportamiento de la temperatura de la planta a lo largo de la simulación

Al comparar la respuesta de la Figura 3.22 con la obtenida en el apartado 3.3.2 en la Figura 3.19 (a), se observa que estas no conservan la misma tendencia. Al observar más de cerca los tiempos de simulación de Fernández-Hernández (2013) así como lo reportado en su trabajo se observa: i) Se partió de un modelo lineal y ii) Los tiempos de respuesta tan cortos indican una prueba de nivel laboratorio. Derivado de lo anterior se concluye que el modelo desarrollado en el presente trabajo contempla comportamientos no lineales obtenidos de la utilización de las curvas de concentración extraídas en ChemSep en particular de las ecuaciones de Antoine, lo que permite modelar procesos de mayor volumen de trabajo.

### 3.5. Productos de la presente tesis

Finalmente, derivado de las actividades de la presente tesis se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Productos derivados de la presente tesis

Concepto	Cantidad	Características	Observaciones
Artículos publicados	1	Trejo Jiménez P.Y., Yáñez-Chávez J. E., Guadarrama-Ramírez E., Ventura-Cruz I., Olguín-Camacho J. 2020. Estudio de la Concentración en Amortiguamiento de Fluidos. La Revista Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola Sustentable, CONAMTI 2020.6.6.	3 alumnos 2 docentes (Anexo J)

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 3.7: Productos derivados de la presente tesis

Concepto	Cantidad	Características	Observaciones
Ponencias en congresos	2	Ponencias en el 5to. Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable. Análisis del efecto de la concentración en amortiguamiento de fluidos. Desarrollo de un control de temperatura aplicado en un proceso de destilación.	6 alumnos 1 docente (Anexo K)
Exposición de carteles	1	Cartel Análisis del efecto de la concentración en a amortiguamiento de fluidos. Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola CONAMTI 2020	(Anexo L)
Formación de capital humano	10	Participación en la elaboración de carteles, maquinado e impresión de piezas, publicación de artículos y ponencias	Liberación de créditos de investigación y participación en congresos
Proyectos financiados	1	Proyecto financiado por el TecNM. Control para la destilación azeotrópica de etanol carburante, Clave 785.20-PD. Vigencia del 1 enero al 31 de diciembre del 2020 Responsables: Olguin-Camacho Juan Colaboradores: Jiménez-Islas Donaji, Ventura-Cruz Donaji	Se entregó informe final 28/01/2021 15:52:06 (Anexo M)

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 3.7: Productos derivados de la presente tesis

Concepto	Cantidad	Características	Observaciones
Proyectos sometidos para financiamiento	1	<p>Desarrollo de un dispositivo de medición de la concentración en mezclas homogéneas de dos elementos mediante dispositivos programables.</p> <p>Convocatoria 2021: PROYECTOS DE DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN,</p> <p>Responsable: Ventura-Cruz, Ignacio.</p> <p>Colaboradores: Muñoz-Barrón, Benigno, Olguin-Camacho, Juan, Rivera-Ríos, Juan Manuel.</p>	<p>Sometido:</p> <p>2021-01-28 00:33:58</p> <p>(Anexo N)</p>

# Capítulo 4

## 4.1. Conclusiones

Se propuso una configuración caldera-destilador, buscando una configuración desmontable, aislada y modular con la finalidad de proporcionar ajustes en el proceso de evaporación y destilación el cual se desarrolló mediante un modelo 3D.

Derivado de modelo 3D ha desarrollado una planta piloto que trabaja a presión atmosférica. Se obtuvo una aproximación de la planta real, mediante la función de transferencia con una correlación del 96.06 % mediante procesos de identificación.

Se implementaron sensores de temperatura tipo K para la medición mediante la plataforma arduino, lo cual proporcionó una implementación simple y modular, puesto que los códigos base para la lectura de la temperatura y la comunicación con la computadora están previamente desarrollados en las librerías de la plataforma.

Las curvas de Temperatura vs fracción molar para la mezcla etanol-agua se utilizaron para determinar un modelo acotado que relaciona la concentración en función de la temperatura de donde se obtuvo una temperatura de separación del etanol de 78.38°C.

A partir de datos experimentales se obtuvo una ecuación que modela el comportamiento de la densidad en función de la fracción molar de etanol, que sirvió para estimar el tiempo de cambio de temperatura de una mezcla etanol agua en donde se muestra un cambio de fase a los 78.38°C.

El predictor Smith presenta un comportamiento sobreamortiguado al aplicar una referencia lo cual favorece a los procesos de destilación, puesto que no existen sobre-impulsos respecto a la temperatura final esperada evitando así temperaturas fuera de la curva de concentración vs temperatura de evaporación.

La respuesta de la contracción ante la temperatura al aplicar el predictor Smith tiende a cero al aplicar una referencia de 100°C e incrementa al reducir la referencia hasta alcanzar su máximo valor a los 78.38°C.

Al comparar los resultados del presente trabajo con los obtenidos por Pérez-Nuñez et al. (2018) se concluyó: i) la planta desarrollada en el presente trabajo se ajusta a una función de primer orden con retardo y su comportamiento es más estable respecto a la planta de referencia que muestra singularidades en su comportamiento, aunado a que su error en estado estable es mayor; ii) El uso del control PI agrega un polo adicional a la función de transferencia lo que genera una respuesta subamortiguada, lo cual se confirma en los dos trabajos.

Comparando los resultados de Fernández-Hernández (2013) se observa que las pruebas a menor volumen de destilación tienen un comportamiento lineal (pruebas de laboratorio), sin embargo, al aumentar el volumen el comportamiento (nivel planta piloto) se modela con las ecuaciones de Antoine y su comportamiento se ajusta a las curvas de fracción molar vs temperatura.

## 4.2. Perspectivas

Realizar la experimentación con la planta piloto utilizando mezclas de etanol-agua para obtener una función de transferencia más ajustada al comportamiento del proceso de evaporación.

Utilizar la recirculación de fluido en la planta para reducir para conocer su efecto.

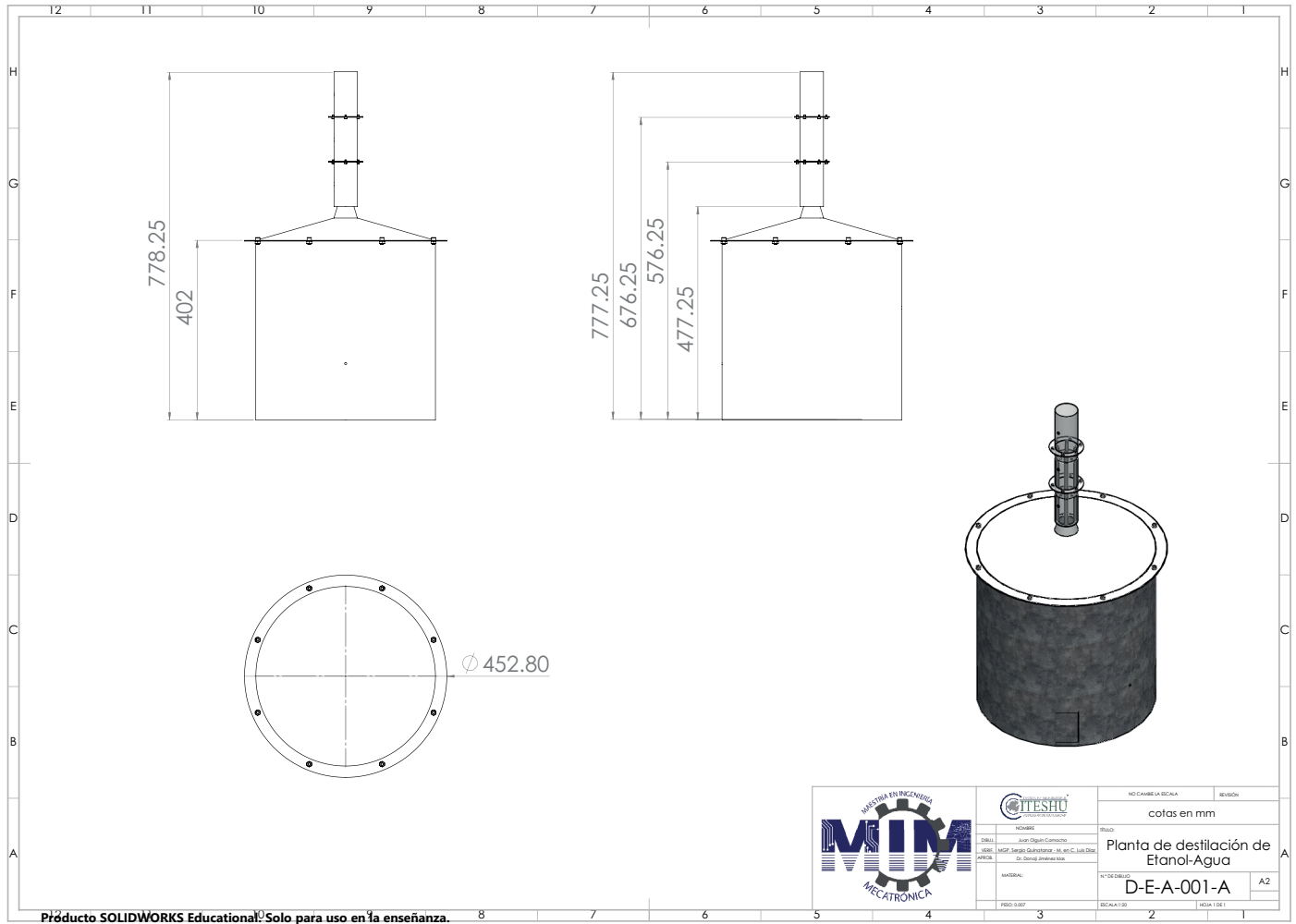
Desarrollar un sistema embebido para la medición del sistema e implementar filtros digitales para mejorar las lecturas.

Estudiar de forma experimental el efecto del controlador y probar otras técnicas de sintonización.

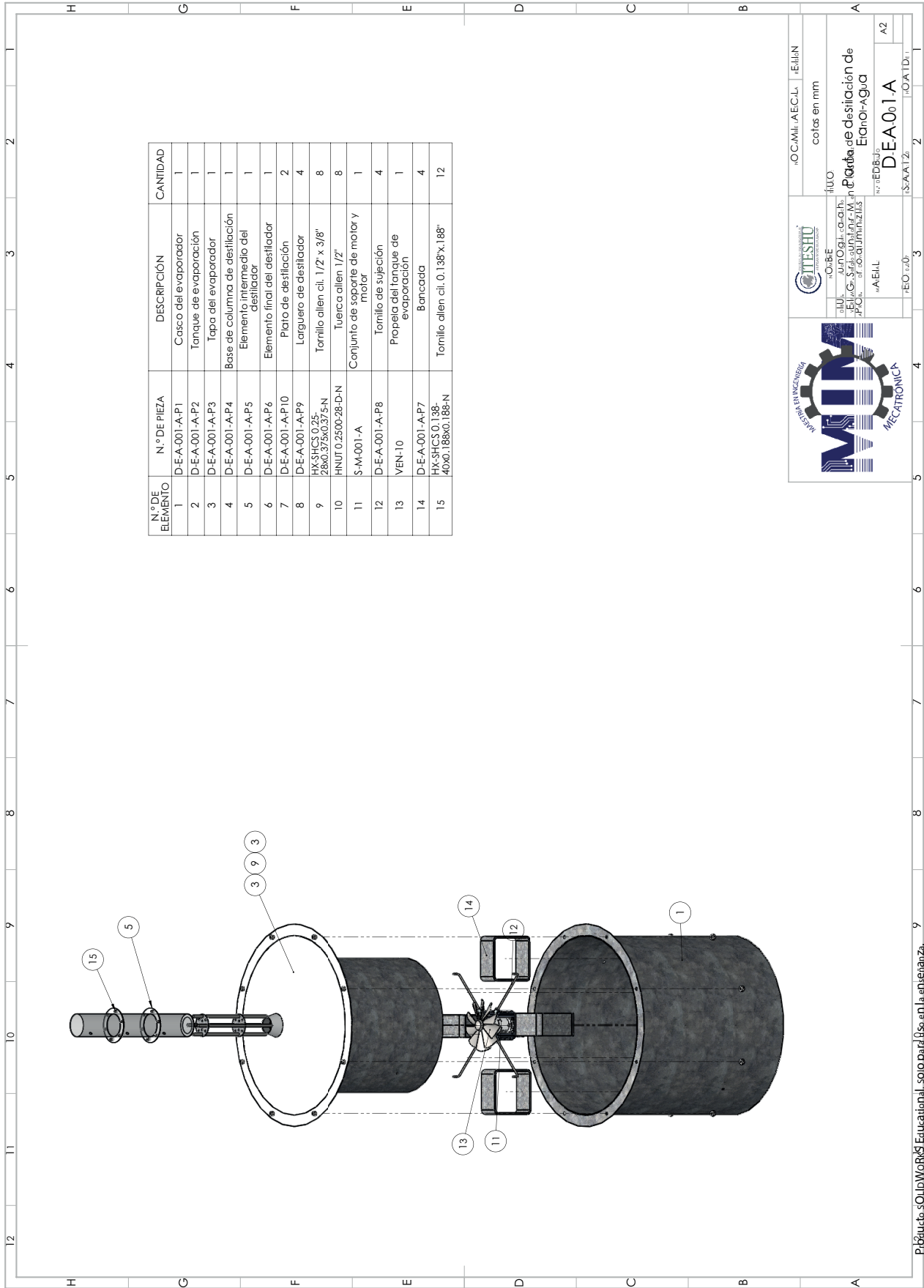
Implementar controladores en espacio de estados y redes neuronales.



# Anexo A

## Planos de construcción



# A. Planos de construcción



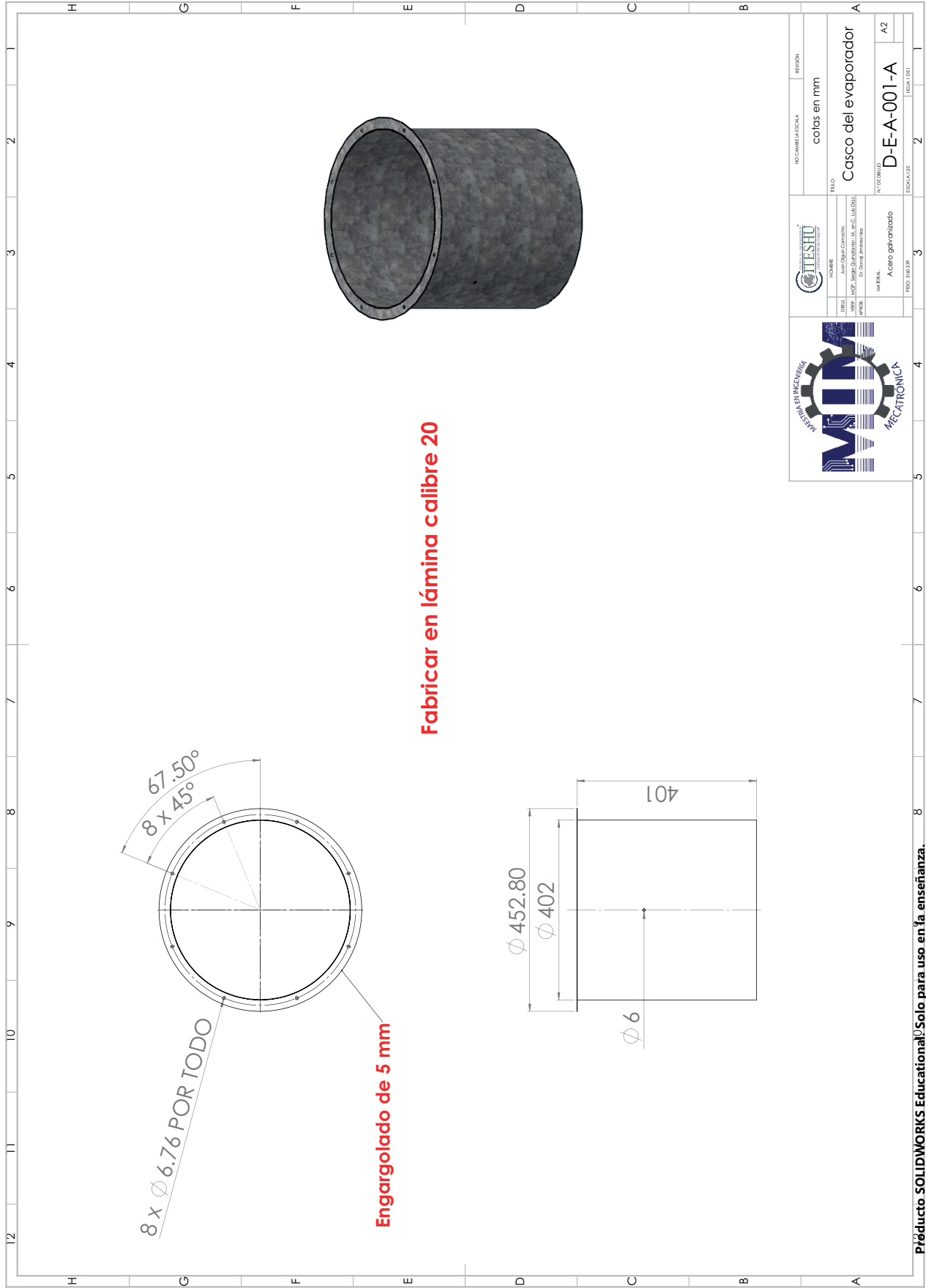



INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS  
 CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES EN MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN  
 INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS  
 CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES EN MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Proyecto: **Planta de destilación de Etanol-Agua**  
 DE-A-01-A  
 A2

Escala: 1:1  
 Hoja: 2 de 2



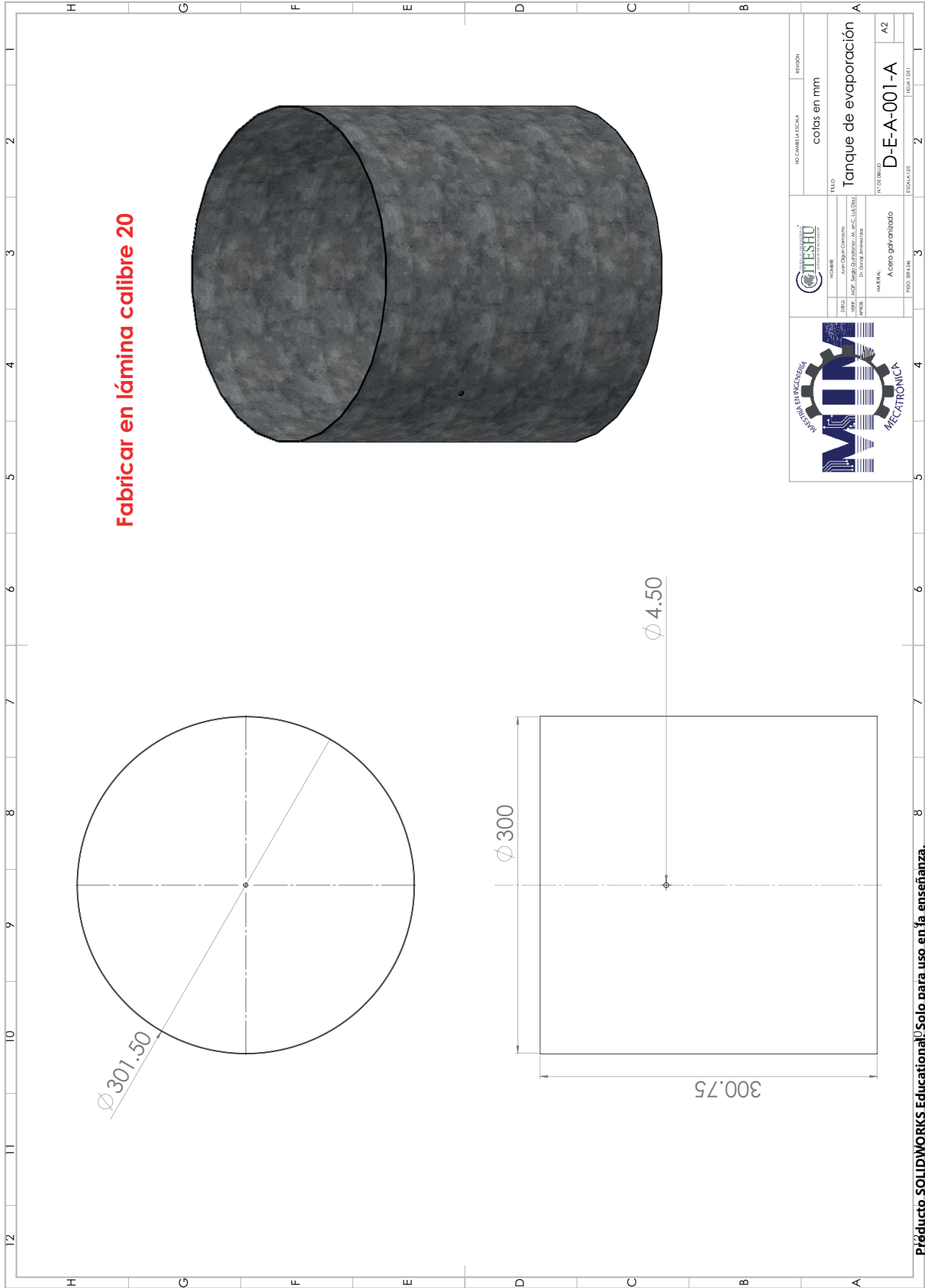


**Fabricar en lámina calibre 20**

**Engargolado de 5 mm**

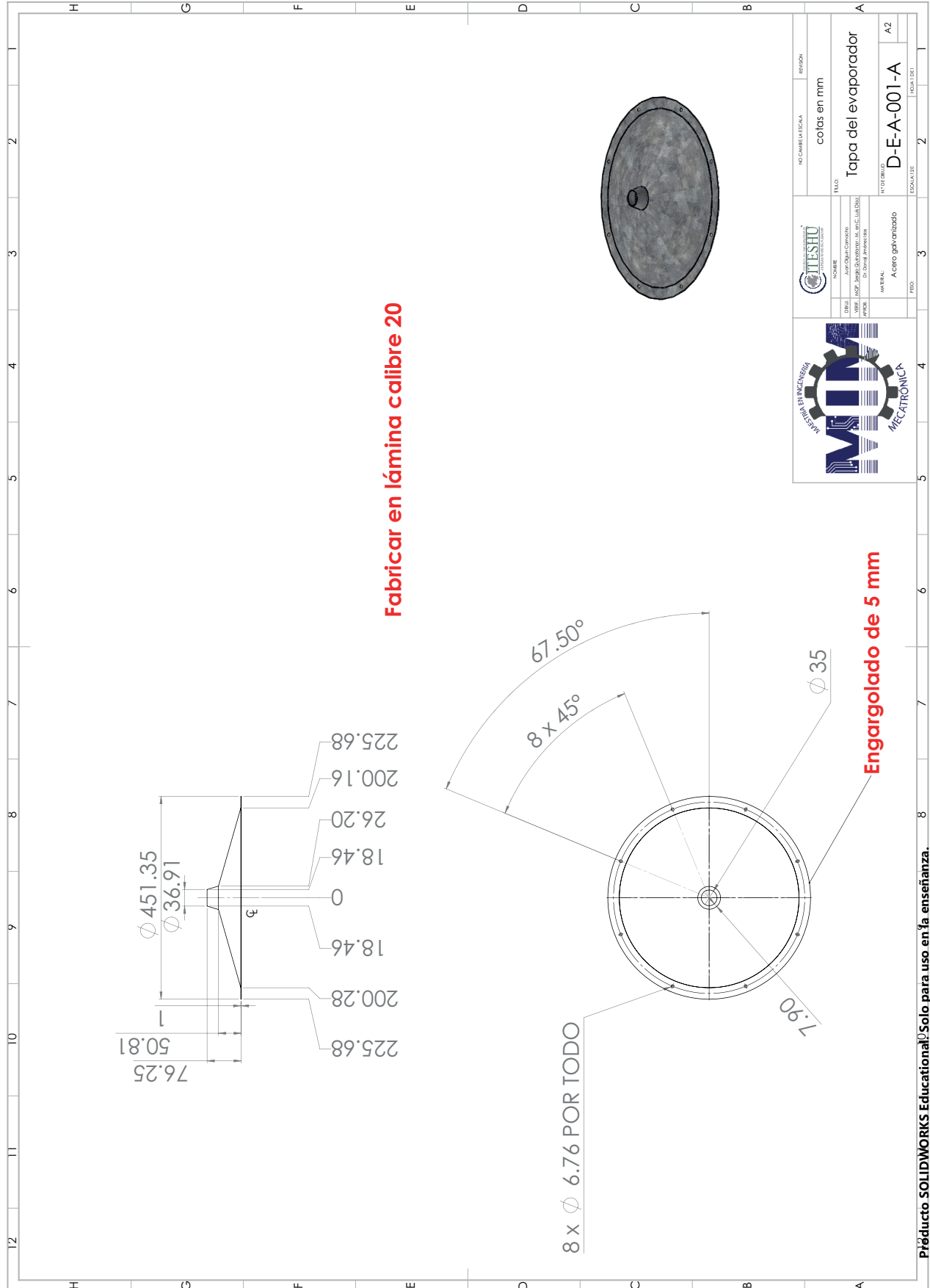
		INSTITUCIÓN EDUCATIVA <b>CITESHU</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO		NO. CARRERA/ESCALA colas en mm	REGION
		NOMBRE JOVANNY CAROLINA GONZALEZ GONZALEZ		TÍTULO <b>Casco del evaporador</b>	ESCALA
DISEÑO JOVANNY CAROLINA GONZALEZ	VERIFICADO JOVANNY CAROLINA GONZALEZ	MATERIAL Acero galvanizado	IN DEBERES <b>D-E-A-001-A</b>	ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

**A. Planos de construcción**



				NO CAMBIE LA ESCALA colas en mm		REVISTA	
TÍTULO <b>Tanque de evaporación</b>		NOMBRE JUAN CARLOS CORTADO		ESCALA 1:25		ESCALA 1:25	
MATERIAL Acero galvanizado		N° DE BORDO D-E-A-001-A		ESCALA 1:25		ESCALA 1:25	
N° DE BORDO D-E-A-001-A		ESCALA 1:25		ESCALA 1:25		ESCALA 1:25	
A2		A2		A2		A2	

Producto SOLIDWORKS Educational: Solo para uso en la enseñanza.



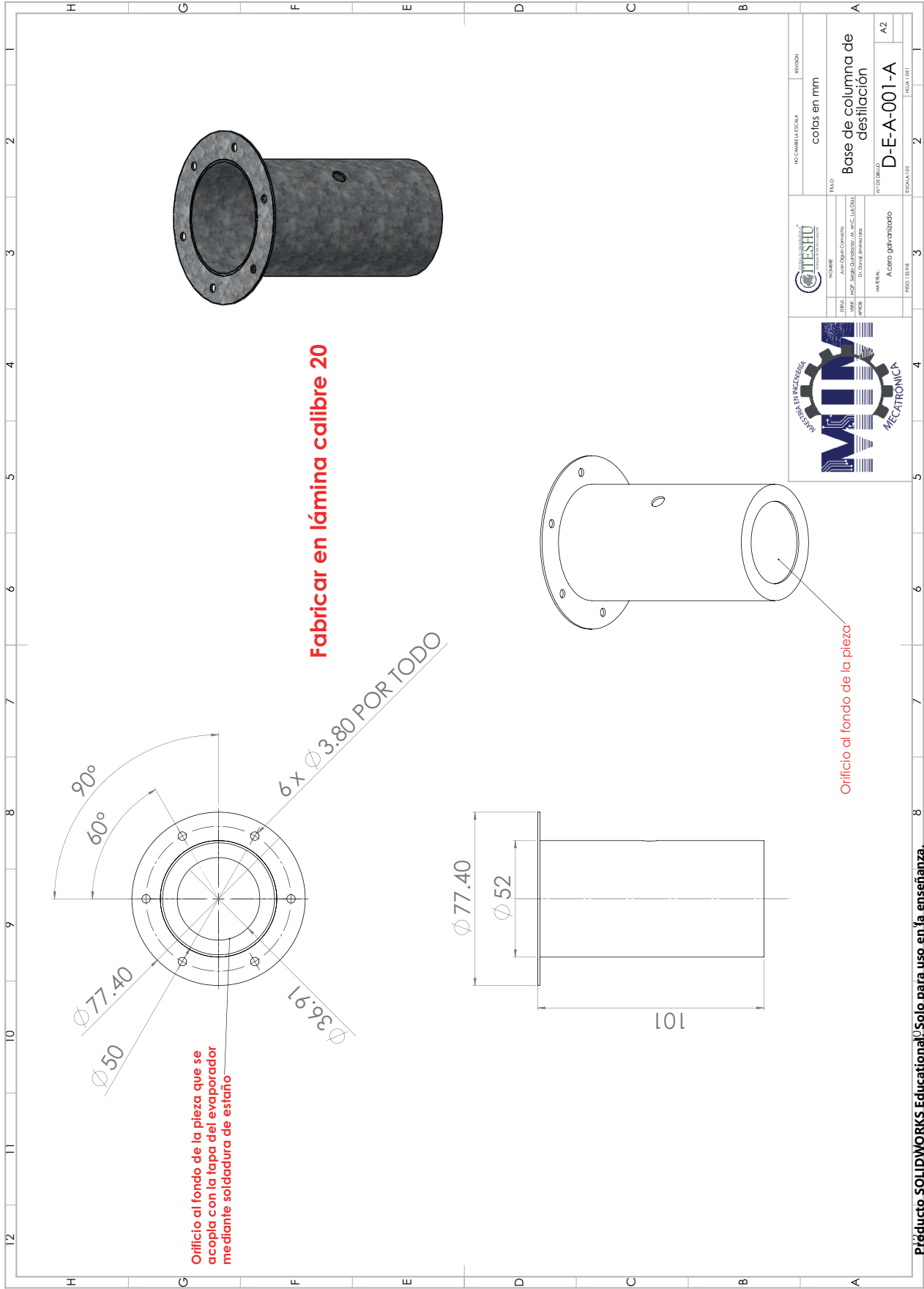
**Fabricar en lámina calibre 20**

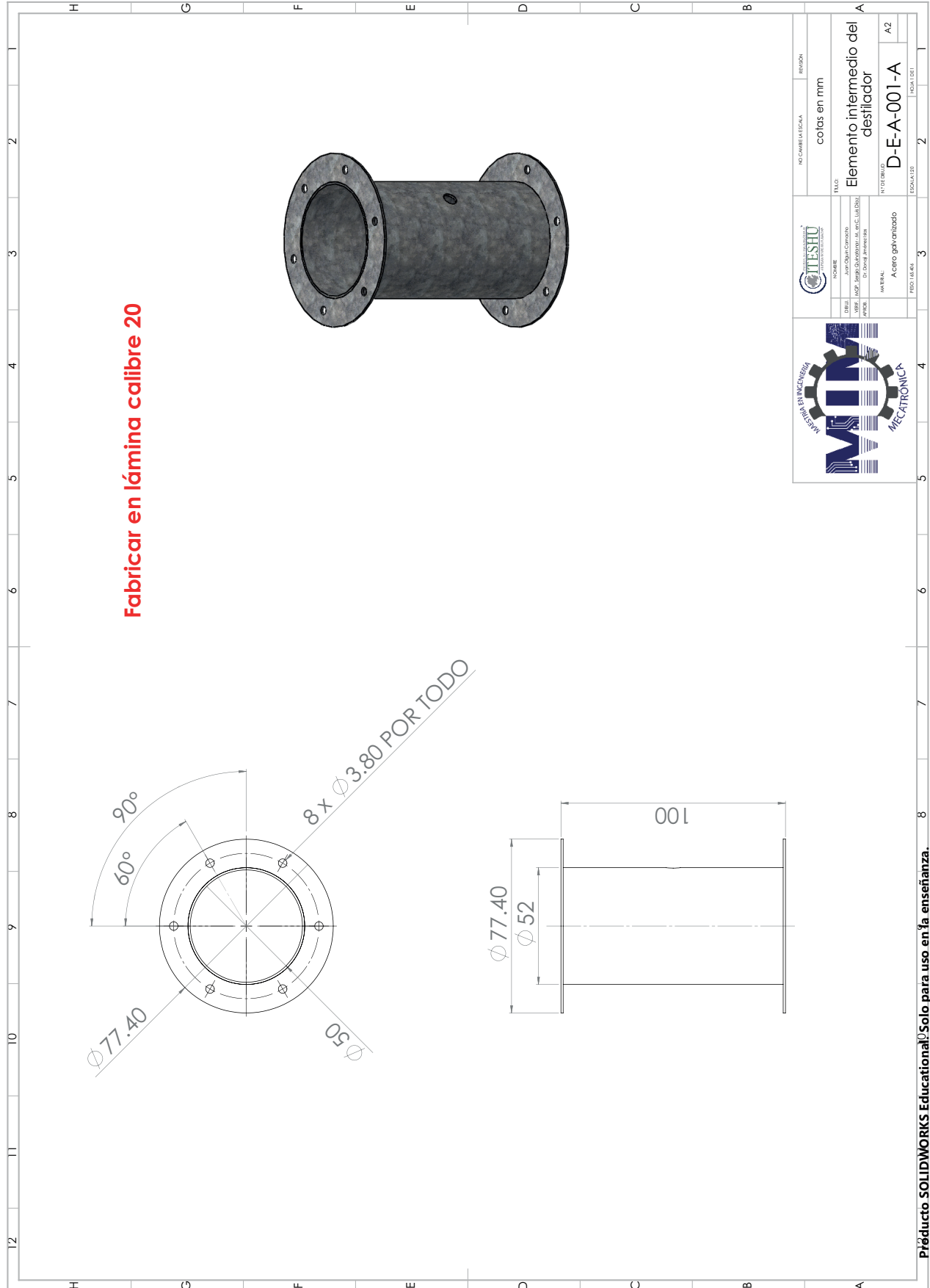
**Engargolado de 5 mm**



				NO. CARRERA/ESCUELA colas en mm	REGION
TÍTULO <b>Tapa del evaporador</b>	MATERIAL Acero galvanizado	INDEBERES D-E-A-001-A	ESCALAS 2	ESCALAS DEB. 2	HOJA DEB. 2
NOMBRE JOYDAN CARLOS JOSE ANTONIO GONZALEZ	MATERIAL Acero galvanizado	INDEBERES D-E-A-001-A	ESCALAS 2	ESCALAS DEB. 2	HOJA DEB. 2

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**A. Planos de construcción**

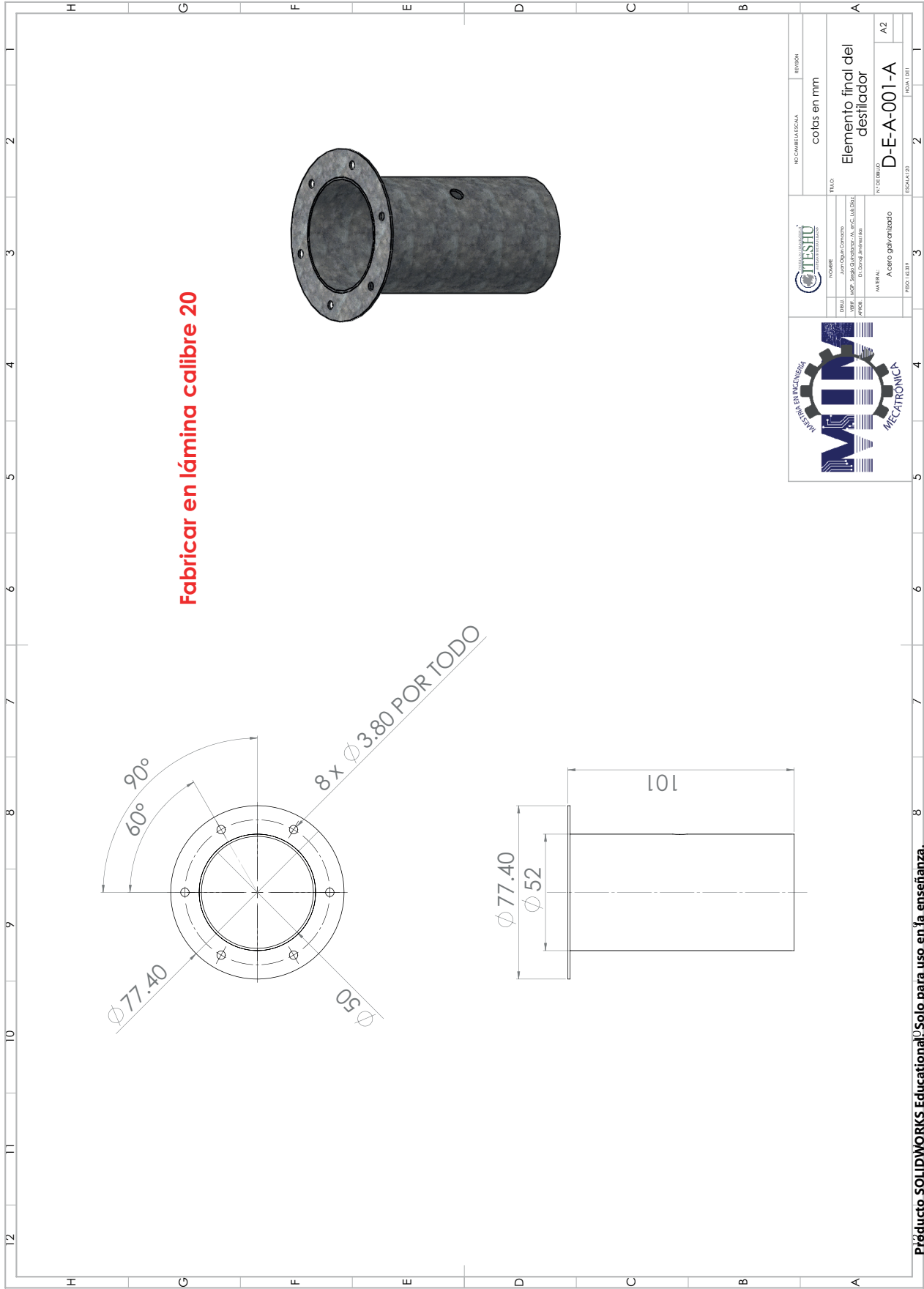




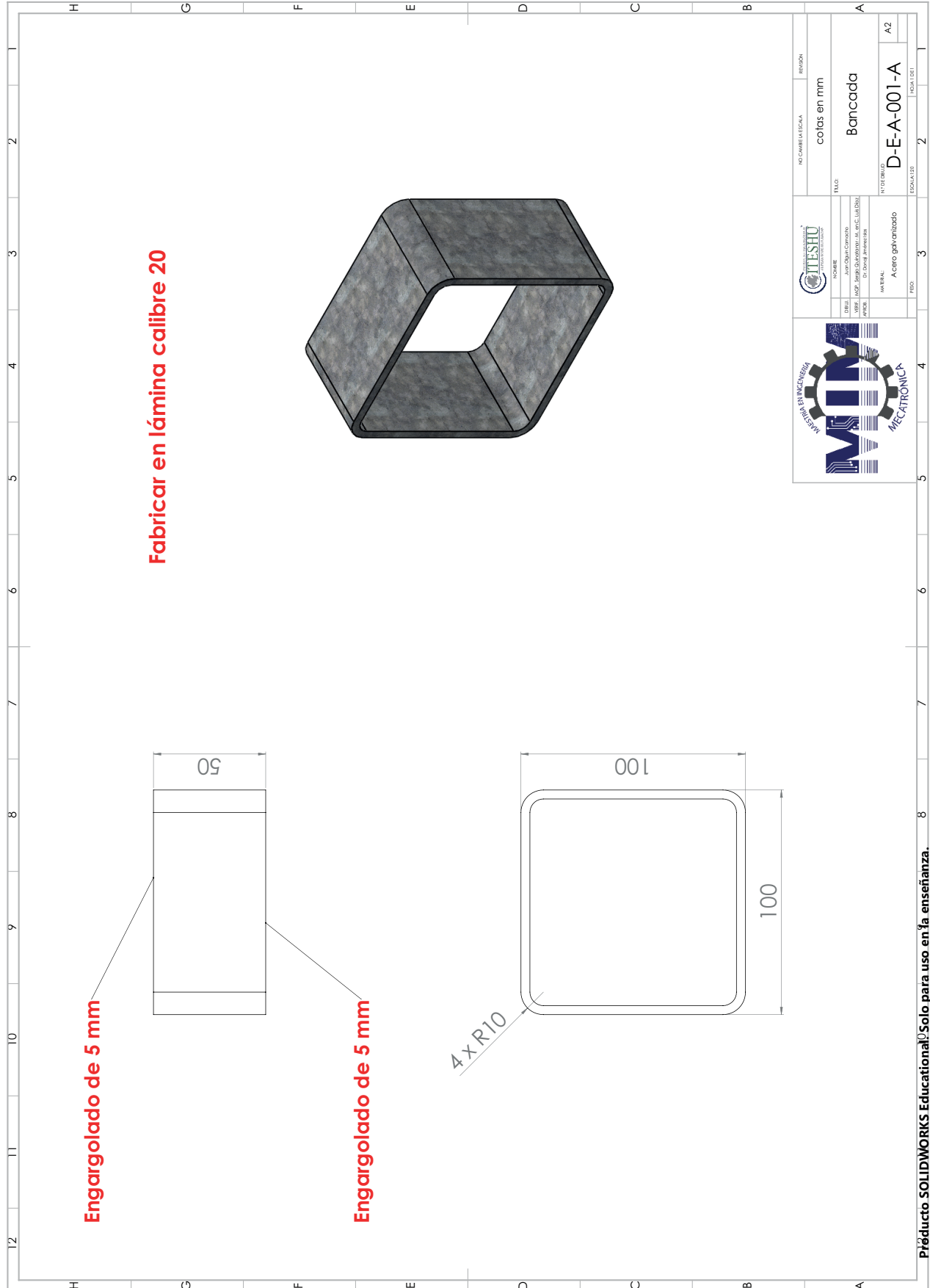
				NO CAMBIA LA ESCALA REGION:	
		TITULO: <b>Elemento intermedio del destilador</b>		colas en mm 2	
NOMBRE: JOYDAN COMENDADO	INSTITUCION: ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA MECATRONICA	MATERIAL: Acero galvanizado	INDEBERIC: D-E-A-001-A	ESCALA: 2:1	HOJA: 1 DE 1
AREA: 01.0000.0000.0000	AREA: 01.0000.0000.0000	PESO: 10.40	A2	2	1

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**A. Planos de construcción**



Producto SOLIDWORKS Educational: Solo para uso en la enseñanza.





Engargolado de 5 mm

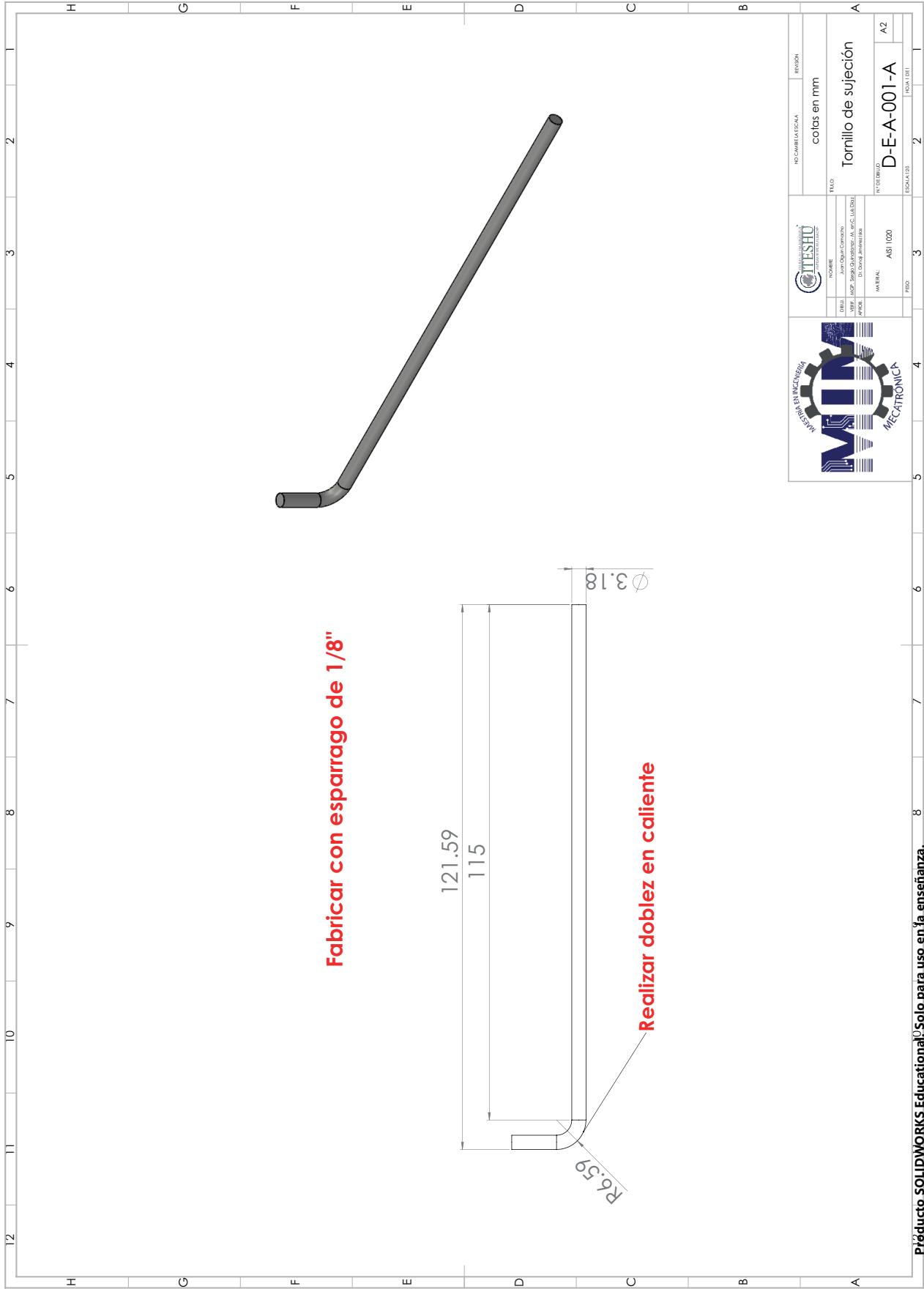
Fabricar en lámina calibre 20

Engargolado de 5 mm

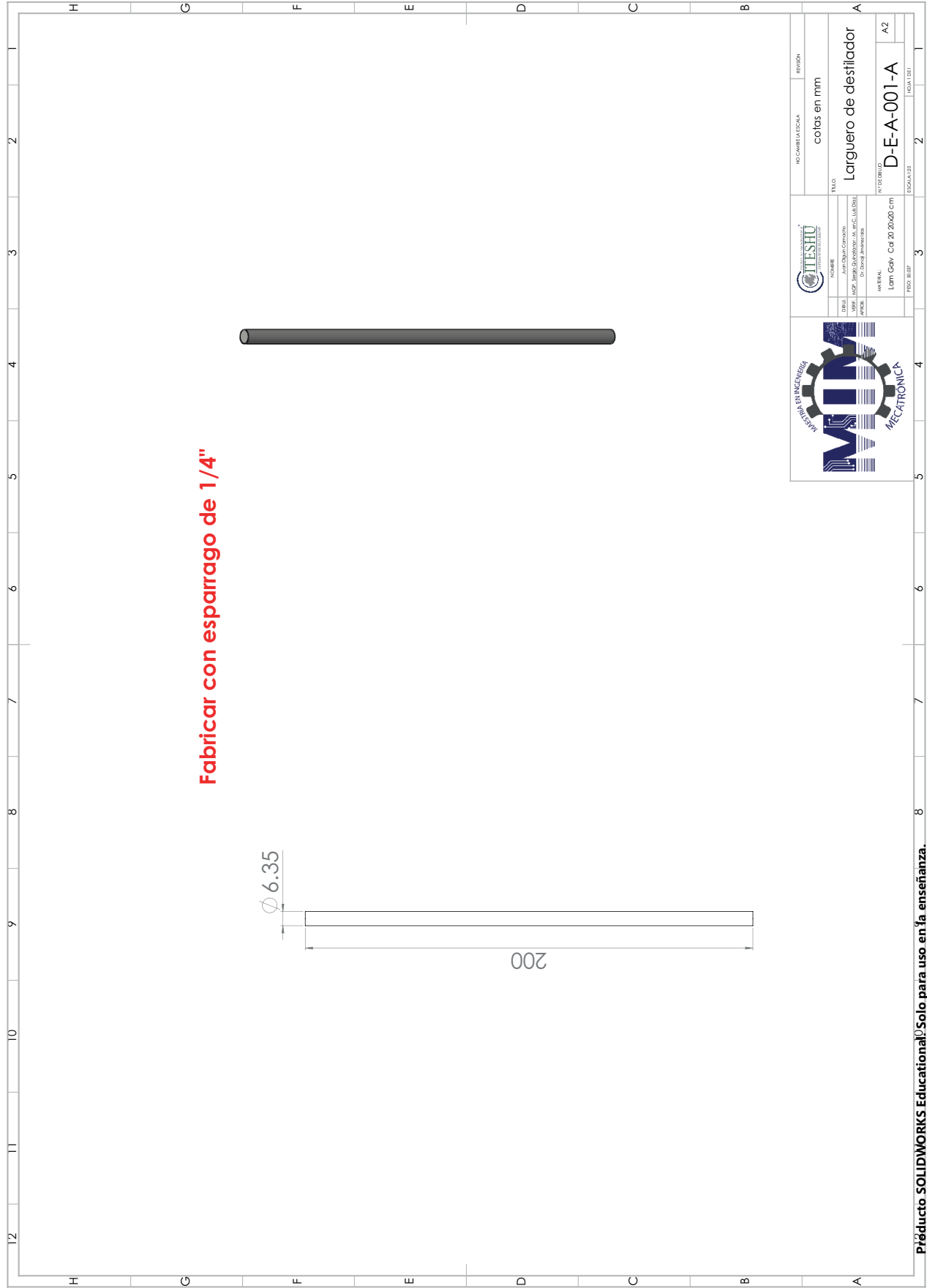
4 x R10



				NO. CARRERA/ESCUELA colas en mm		REGION	
DESEMPEÑO CALIFICACIÓN APROBADO		NOMBRE JOVANNY CARLOS GONZALEZ GONZALEZ		TÍTULO Bancoda		ESCALA: 2:1	
MATERIAL Acero galvanizado		INDEBERENTE D-E-A-001-A		ESCALA: 2:1		HOJA 1 DE 1	

**A. Planos de construcción**



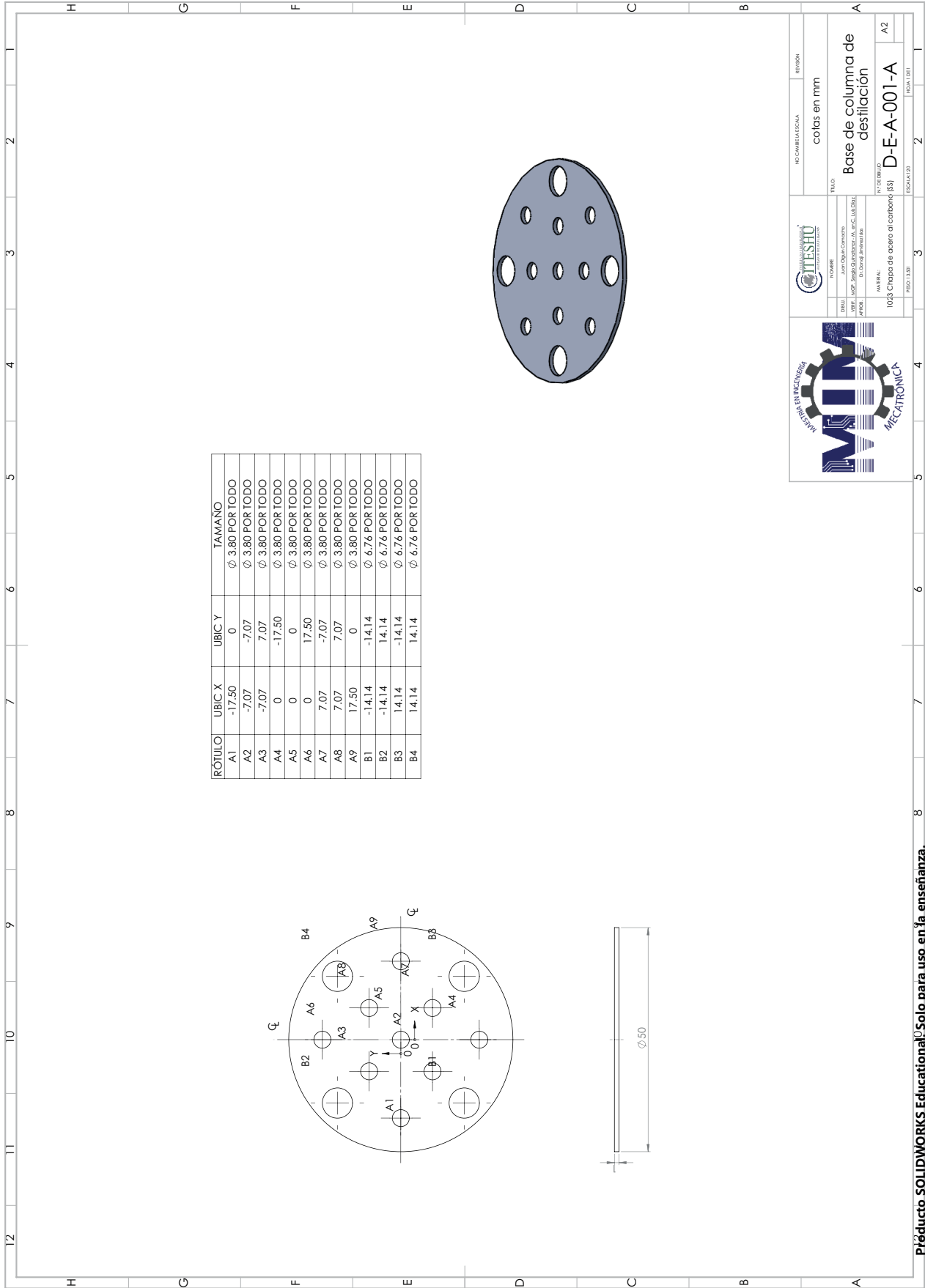




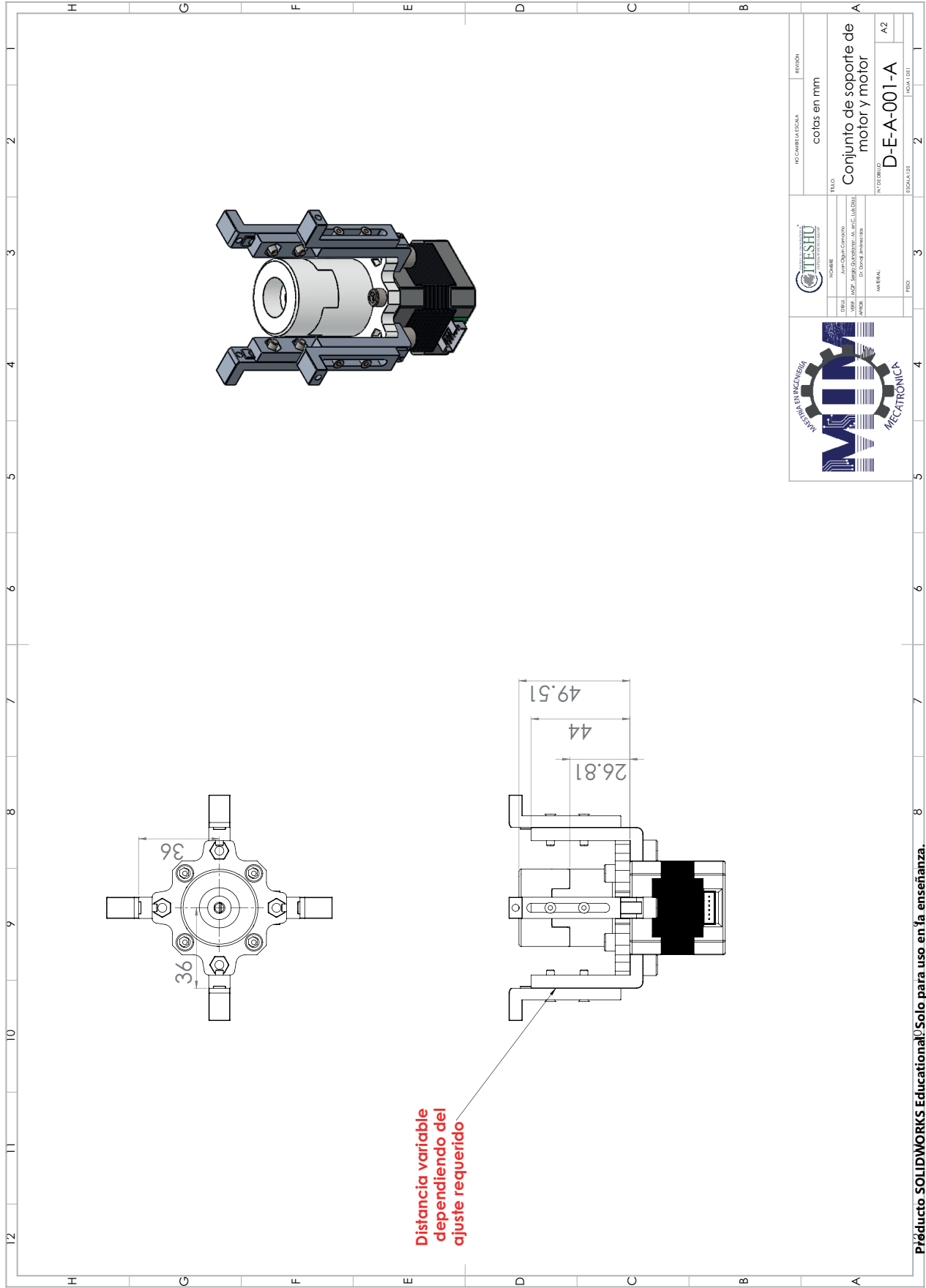
				NO CAMBIA ESCALA	REVISION
		NOMBRE: JOSE DANIEL GONZALEZ APELLIDOS: GONZALEZ GONZALEZ		TITULO: colas en mm	
DISEÑO: JOSE DANIEL GONZALEZ	DIBUJO: JOSE DANIEL GONZALEZ	MATERIAL: Lam. Galv. Cal 20.20x20 cm	N° DE BARRIOS: D-E-A-001-A	ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1
INSTITUCION: INSTITUCION TECNICA DE INGENIERIA MECATRONICA		MATERIAL: Lam. Galv. Cal 20.20x20 cm		ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**A. Planos de construcción**



Producto SOLIDWORKS Educational: Solo para uso en la enseñanza.



# A. Planos de construcción

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	nema12	Motor a pasos para impulsar de pro펠eta	1
2	S-M-001-A-P1	Base del motor	1
3	S-M-001-A-P2	Poste fijo	4
4	S-M-001-A-P3	Poste móvil	4
5	S-M-001-A-P4	Conector del motor	1
6	S-M-001-A-P5	Conector de la pro펠eta	1
7	HX-SHCS 0.19-32x0.25x0.25-N	Tornillo allen cil. 0.25" xxx "	4
8	HX-SHCS 0.25-20x0.25-N	Tornillo allen cil. 0.25" xxx"	4
9	SCUSCREW 0.138-40x0.625x0.425-HX-N	Tornillo allen cil. 0.625" xxx"	8

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISION:

cofas en mm

TÍTULO

**Conjunto de soporte de motor y motor**

N.º DE BARRIO

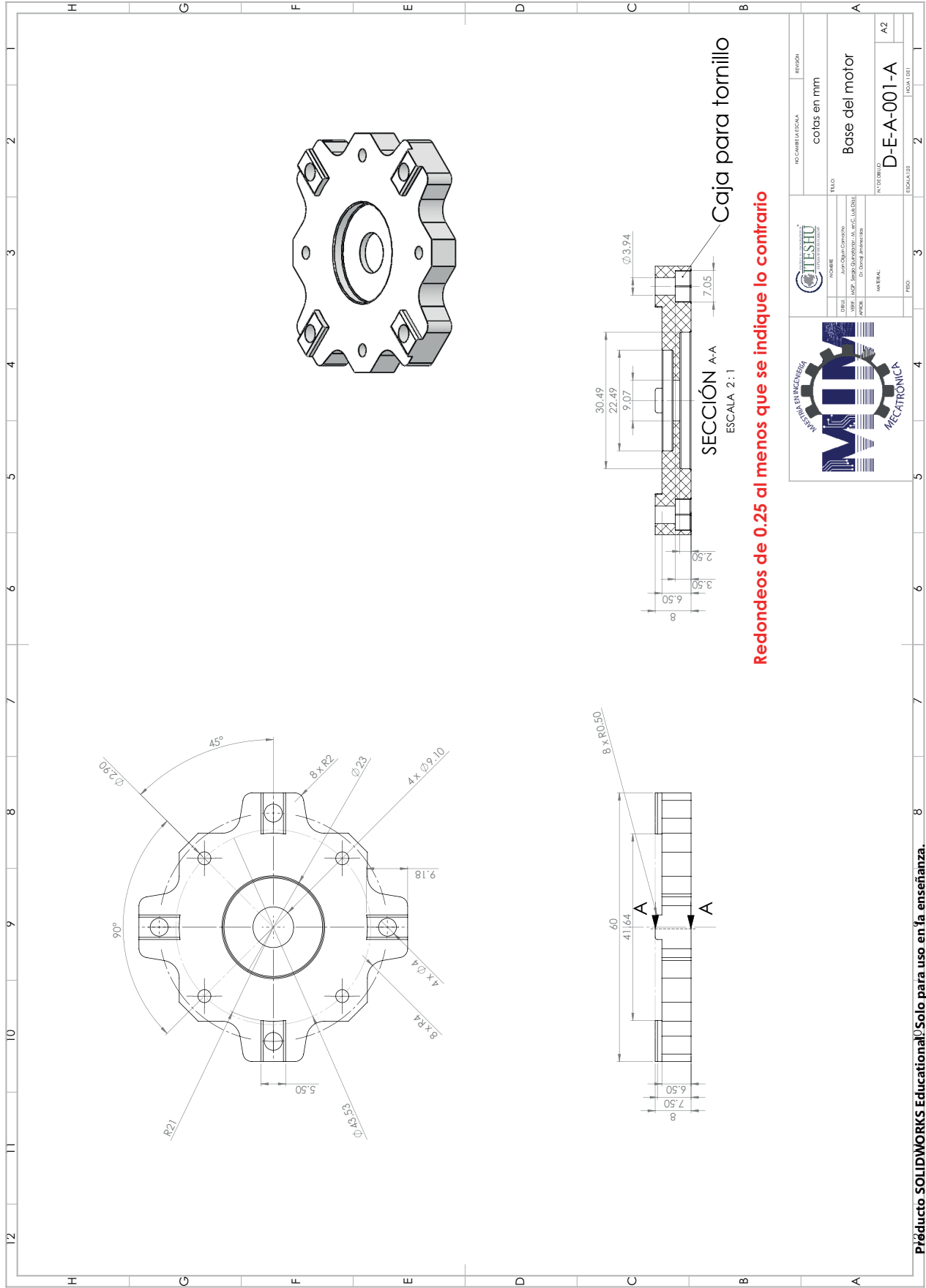
**D-E-A-001-A**

ESCALA 1:25

ESCALA 1:10

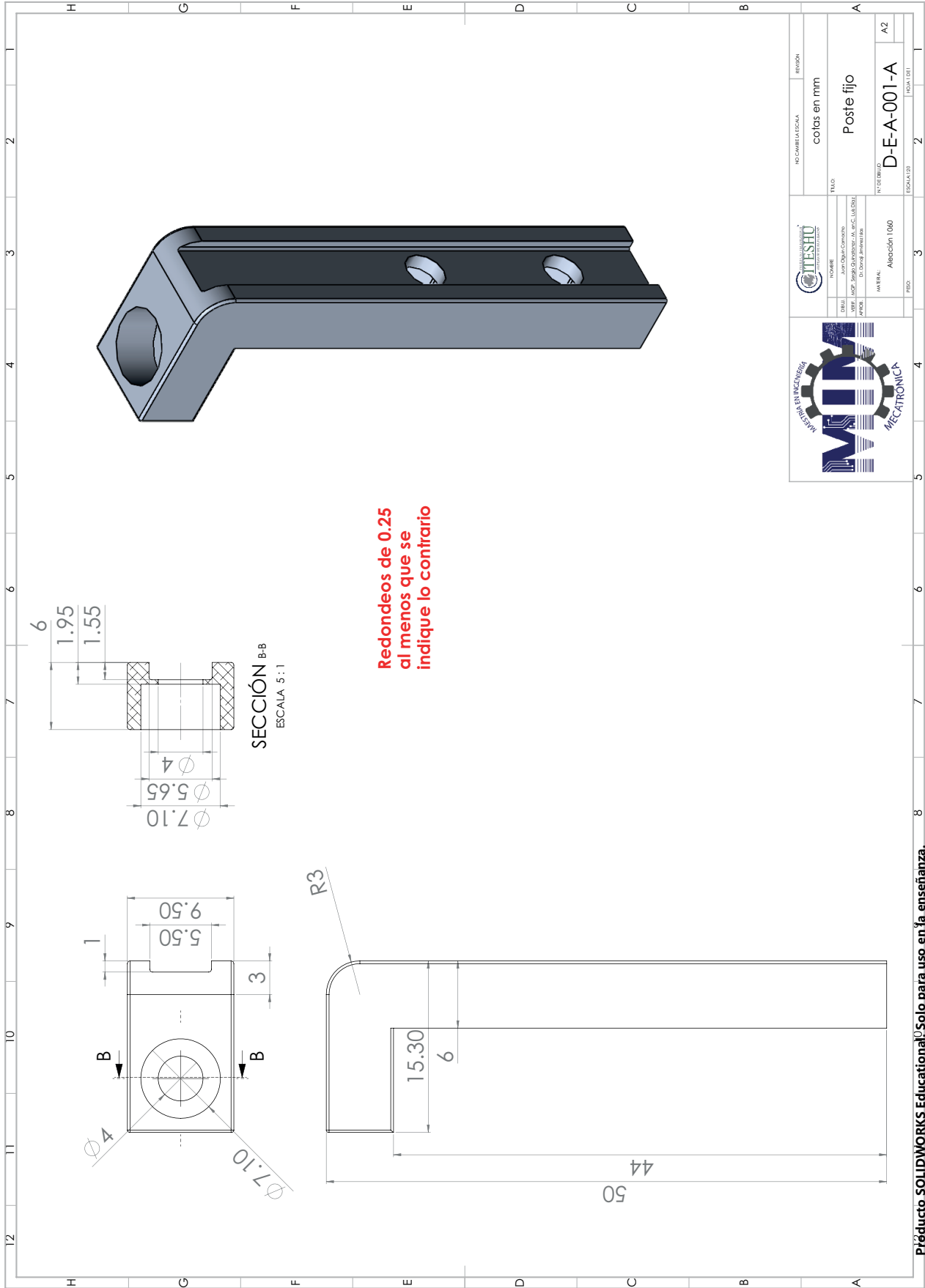
FECHA 1/2011

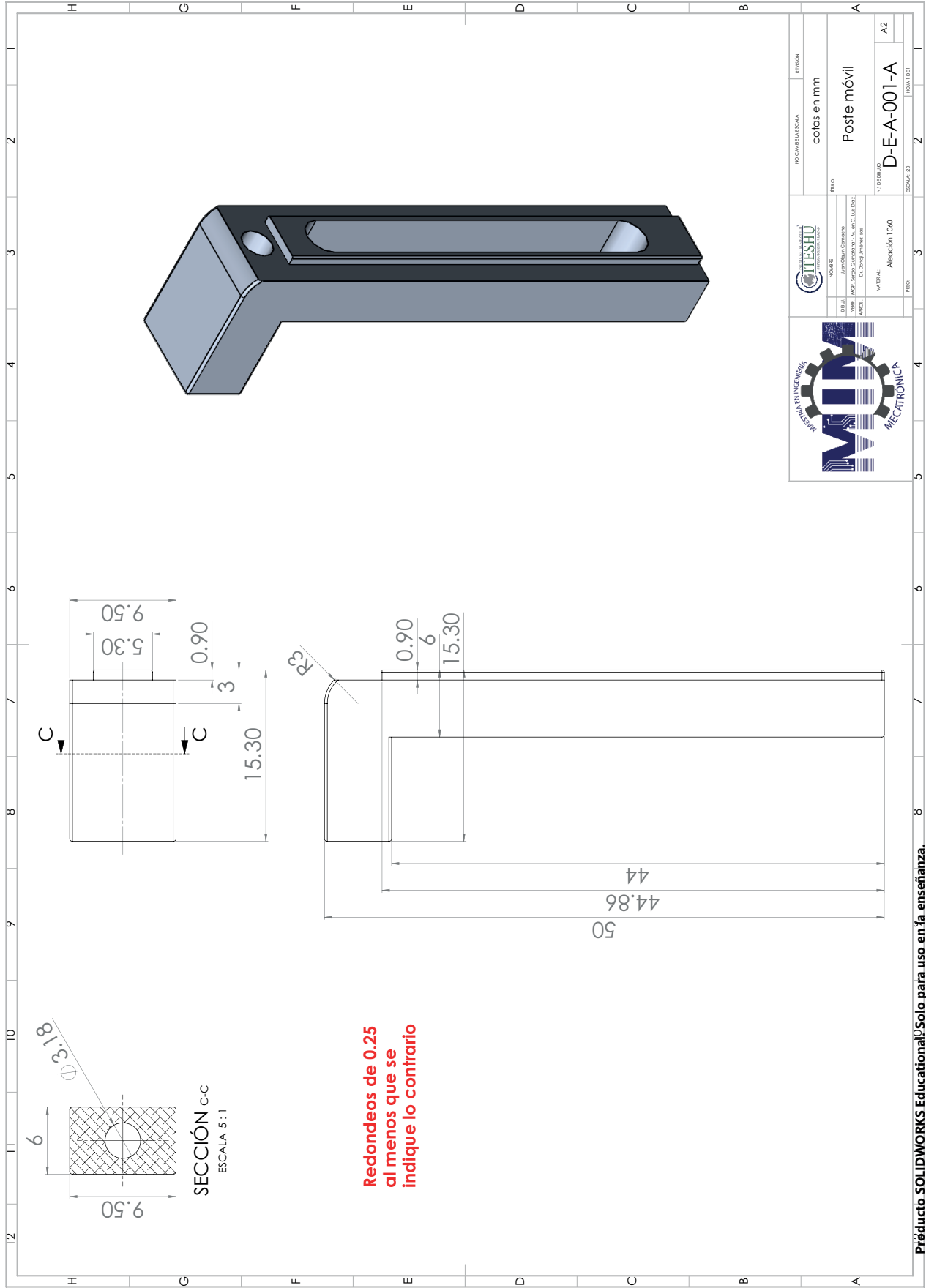
**Producto SOLIDWORKS Educational: Solo para uso en la enseñanza.**



**Redondeos de 0.25 al menos que se indique lo contrario**

NOMBRE: JOSE ANTONIO GARCIA GONZALEZ	NOMBRE: colas en mm	TÍTULO: Base del motor	REGION:
INSTITUCIÓN: ESCUELA DE INGENIERIA MECATRONICA	NOMBRE DEL DISEÑO: D-E-A-001-A	ESCALA:	HOJA DE:
FECHA:	ESCALA:	HOJA:	DE:

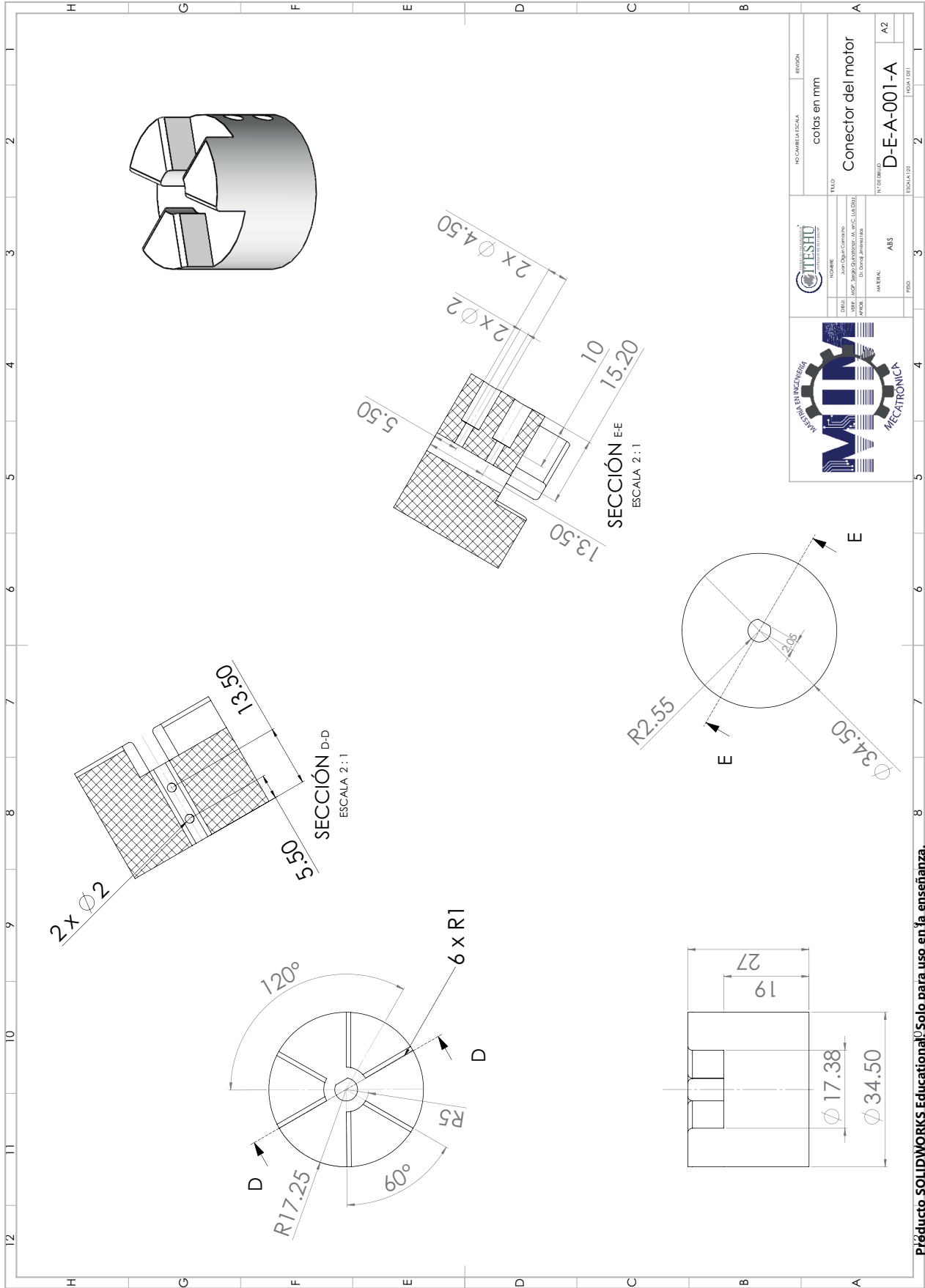




				NO CAMBIA LA ESCALA colas en mm	REVISIÓN
TÍTULO Poste móvil	AUTOR JUAN CARLOS GONZÁLEZ JOSE ANTONIO GONZÁLEZ GILBERTO GONZÁLEZ	MATERIAL Aluminio 1060	ESCALA 1:25	INDEBERENTE D-E-A-001-A	A2
FECHA	PERIODO	ESCALA 1:25	ESCALA 1:25	ESCALA 1:25	ESCALA 1:25

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**A. Planos de construcción**



Producto SOLIDWORKS Educational: Solo para uso en la enseñanza.







## Anexo B

# Lectura de temperatura

```
1 /** MAX6675 Thermocouple Reader Example Code
2 *
3 * This is so simple a library would be silly !
4 *
5 * 6675 Module ==> Arduino
6 * CS ==> D10
7 * SO ==> D12
8 * SCK ==> D13
9 * Vcc ==> Vcc (5v OK)
10 * Gnd ==> Gnd
11 *
12 * You can change the pin assignments below , any pins you want are fine .
13 *
14 * Upload coade and open your Serial terminal at 9600 to see the temperature
15 * printed every 1.5 seconds . That 's all !
16 *
17 */
18
19 #include <SPI.h>
20
21 #define MAX6675_CS 10
```

## B. Lectura de temperatura

---

```
22 #define MAX6675_SO 12
23 #define MAX6675_SCK 13
24
25
26 float temperatura;
27 void setup () {
28     Serial.begin (115200);
29     pinMode (9, OUTPUT );
30     digitalWrite (9, LOW );
31
32 }
33
34 void loop () {
35     // put your main code here , to run repeatedly :
36     // Serial .print (readThermocouple ());
37     //Serial .println ( ' ');
38
39 // // Just for completeness
40 // if (readThermocouple () > 33)
41 // {
42 //     Serial .println ("Wow it 's hot today !");
43 // }
44 // else if (readThermocouple () < 10)
45 // {
46 //     Serial .println ("I hope you have your warm clothes on!");
47 // }
48     temperatura=readThermocouple (); // leer temperatura
49
50
51     digitalWrite (9, HIGH );
52     delay ((int)1000);
53     digitalWrite (9, LOW );
54     delay (0);
```

```

55
56 Serial.print (temperatura);
57 Serial.println ( ' ');
58 }
59
60 double readThermocouple() {
61
62 uint16_t v;
63 pinMode (MAX6675_CS, OUTPUT );
64 pinMode (MAX6675_SO, INPUT );
65 pinMode (MAX6675_SCK, OUTPUT );
66
67 digitalWrite (MAX6675_CS, LOW );
68 delay (1);
69
70 // Read in 16 bits ,
71 // 15 = 0 always
72 // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
73 // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
74 // 1..0 = uninteresting status
75
76 v = shiftIn (MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST );
77 v <= 8;
78 v |= shiftIn (MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST );
79
80 digitalWrite (MAX6675_CS, HIGH );
81 if (v & 0x4)
82 {
83 // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
84 return NAN;
85 }
86
87 // The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits

```

## B. Lectura de temperatura

---

```
88  v >= 3;
89
90  // The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
91  return v*0.25;
92 }
```

## Anexo C

# Carga de datos para identificación

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 A=load( 'Temp2.txt ');
5 %r=A(:,1) ;
6 %u=A(:,2) ;
7 tam=size(A);
8 ref=100*ones(tam);
9 t=linspace(0,1.5*tam(1),tam(1))
10 plot(t,A,t,ref)
11 grid on
12 axis([0 7000 0 110])
13 legend( 'Respuesta ', 'Referencia ', 'Location ', 'southeast ');
14 title( 'Respuesta real de la planta ante una referencia ');
15 ylabel( 'Temperatura (°C)');
16 xlabel( 'tiempo (s)');
```





## Anexo D

# Cálculo del tiempo de calentamiento

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 Datos=load( 'TvsX.txt ');
5 [~, s] = sort(Datos(:, 1));
6 Datos=Datos(s, :);
7 T=Datos(:,1); %Temperatura de Separacion °C
8 Xa=Datos(:,2); % Concetracion
9 T0=25; % Temperatura Inicial °C
10 L=30; %volumen en litros
11 CP=4180; %Calor especifico J/(Kg°C)
12 P=1500; %Potencia J/Seg.
13 tam=size(Xa);
14 t0=0;
15 for i=1:tam(1)
16 p(i)=0.0938*Xa(i)^2 - 0.2912*Xa(i) + 0.9786; %densidad en g/ml
17 Q(i)=p(i)*L*CP*(T(i)-T0);
18 tt(i)=Q(i)/P;
19 t(i)=tt(i)+t0;
20 t0=t(i);
21 T0=T(i);
22 TT(i)=T(i);
23 end
24 t=[0 t];
25 TT=[25 TT];
26 figure()
```

## D. Cálculo del tiempo de calentamiento

---

```
27 plot(t,TT)
28 grid on
29 title( 'Curva de calentamiento ');
30 xlabel( 'Tiempo (s)');
31 ylabel( 'Temperatura (°C)');
```

## Anexo E

# Cálculo de la densidad respecto a la fracción molar de etanol

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 Datos=load( 'TvsX.txt ');
5 [~, s] = sort(Datos(:, 2));
6 Datos=Datos(s, :);
7 Xa=Datos(:,2); % Concentracion
8 L=30; %volumen en litros
9 CP=4180; %Calor especifico J/(Kg°C)
10 P=1500; %Potencia J/Seg.
11 p=0.0938*Xa.^2 - 0.2912*Xa + 0.9786; %densidad en g/ml
12 figure()
13 plot(Xa,p)
14 grid on
15 title('Curva de densidad ');
16 xlabel('Fraccion molar de etanol (Xa)');
17 ylabel('Densidad (\rho = g/ml)');
```



## Anexo F

# Gráfica Txy

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 Datos=load( 'Txy2.txt ');
5 T=Datos(:,1);
6 x=Datos(:,2);
7 y=Datos(:,3);
8 plot(x,T, 'b',y,T, 'r')
9 grid on
10 legend( 'Temperatura de evaporación','Temperatura de rocío');
11 title( 'Fracción Molar vs Temperatura Etanol +agua @ p = 1 (atm)');
12 ylabel( 'Temperatura (°C)');
13 xlabel( 'x Etanol');
```



## Anexo G

# Simulación del controlador Smith

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 %% Funcion de transferencia de una sistema con retardo
5 s = tf ( 's' );
6 P = exp (-600 * s) * (0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
7 P.InputName = 'u' ;
8 P.OutputName = 'y' ;
9 P
10 % Respuesta escalon de la funcion de trasferncia
11 figure();step(P), grid on
12 %% Sintonizacion de PID de una funcion de tranferencia con retardo
13 Cpi = pidtune(P,pidstd(1,1),1/1200);
14 Cpi
15 % Lazo cerrado de control con realimentacion unitaria
16 Tpi = feedback([P*Cpi,1],1,1,1); % closed -loop model [ysp;d]->y
17 Tpi.InputName = { 'ysp' 'd'};
18 % Respuesta escalon del lazo de control
19 figure();step(Tpi), grid on
20 %% Predictor smith
21 % Filtro pasa bajas de primer orden con constante de 2seg utilizado para
22 %el predictor smith
23 F = 1/(20*s+1);
24 F.InputName = 'dy';
25 F.OutputName = 'dp';
26 % Funcion de transferencia del proceso
```

## G. Simulación del controlador Smith

---

```
27 P.InputName = 'u';
28 P.OutputName = 'y0';
29 % Modelo del predictor
30 Gp = (0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
31 Gp.InputName = 'u';
32 Gp.OutputName = 'yp';
33 Dp = exp(-600 * s);
34 Dp.InputName = 'yp'; Dp.OutputName = 'y1';
35 % Planta general
36 S1 = sumblk('ym = yp + dp');
37 S2 = sumblk('dy = y0 - y1');
38 Plant = connect(P,Gp,Dp,F,S1,S2, 'u','ym');
39 % Diseño de control PI con 0.08 rad/s bandwidth and 90 degrees phase margin
40 Options = pidtuneOptions('PhaseMargin',90);
41 C = pidtune(Plant,pidstd(1,1),1/1200,Options);
42 C.InputName = 'e';
43 C.OutputName = 'u';
44 C
45 % Ensamble del modelo de bucle cerrado de [y_sp,d] para y
46 Sum1 = sumblk('e = ysp - yp - dp');
47 Sum2 = sumblk('y = y0 + d');
48 Sum3 = sumblk('dy = y - y1');
49 T = connect(P,Gp,Dp,C,F,Sum1,Sum2,Sum3,{'ysp','d'},'y');
50 figure();step(T, 'b',Tpi, 'r--')
51 grid on
52 legend('Smith Predictor','PI Controller')
```



## Anexo H

# Simulación de la respuesta del sistema a diversas entradas

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 %% Funcion de transferencia de una sistema con retardo
5 s = tf ( 's' );
6 P = exp (-600 * s) * (0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
7 P.InputName = 'u' ;
8 P.OutputName = 'y' ;
9 % Respuesta escalon de la funcion de trasferncia
10
11 figure ();step(P), grid on
12 %% Sintonizacion de PID de una funcion de tranferencia con retardo
13 Cpi = pidtune(P,pidstd(1,1),1/1200);
14 % Lazo cerrado de control con realimentacion unitaria
15
16 Tpi = feedback([P*Cpi,1],1,1,1); % closed-loop model [y; d]->y
17 Tpi.InputName = { 'y' 'd' };
18
19 %% Predictor smith
20 % Filtro pasa bajas de primer orden con constante de 2seg utilizado para
21 %el predictor smith
22
23 F = 1/(20*s+1);
```

## H. Simulación de la respuesta del sistema a diversas entradas

```
24 F.InputName = 'dy';
25 F.OutputName = 'dp';
26
27 % Funcion de transferencia del proceso
28 P.InputName = 'u';
29 P.OutputName = 'y0';
30
31
32
33 % Modelo del predictor
34 Gp = (0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
35 Gp.InputName = 'u';
36 Gp.OutputName = 'yp';
37
38 Dp = exp(-600 * s);
39 Dp.InputName = 'yp'; Dp.OutputName = 'y1';
40
41 % Planta general
42 S1 = sumblk('ym = yp + dp');
43 S2 = sumblk('dy = y0 - y1');
44 Plant = connect(P,Gp,Dp,F,S1,S2, 'u','ym');
45
46 % Diseño de control PI con 0.08 rad/s bandwidth and 90 degrees phase margin
47 Options = pidtuneOptions('PhaseMargin',90);
48 C = pidtune(Plant,pidstd(1,1),1/1200,Options);
49 C.InputName = 'e';
50 C.OutputName = 'u';
51
52 % Ensamble del modelo de bucle cerrado de [y_sp,d] para y
53 Sum1 = sumblk('e = ysp - yp - dp');
54 Sum2 = sumblk('y = y0 + d');
55 Sum3 = sumblk('dy = y - y1');
56 T = connect(P,Gp,Dp,C,F,Sum1,Sum2,Sum3,{'ysp','d'},'y');
57 %% Simulacion multiples escalones
58
59 %Entrada escalon con redefinicion de la amplitud del escalón
60
61 t=0:1.5:2*60*60;
62 f=60*ones(size(t));
63 t1=(2*60*60+1.5):1.5:4*60*60;
64 D=zeros(size(t));
65 f1=90*ones(size(t1));
```

```

66 D=[D zeros(size(t1))];
67 t=[t t1];
68 f=[f f1; ...
69     D];
70
71 [f_y,tOut,x]=lsim(T,f,t, 'b');
72 plot (tOut,f_y)
73 hold on
74 plot (t,f(1,:), 'k')
75 grid on
76 [f_y,tOut,x]=lsim(Tpi,f,t);
77 plot (tOut,f_y, 'r--')
78 title( 'Respuesta ante la redefinicion del escalón')
79 ylabel( 'Temperatura (°C)')
80 xlabel( 'tiempo (s)')
81 axis([0 15000 0 95])
82 legend( 'Predictor Smith ', 'Referencia ', 'Controlador PI', 'Location ', 'southeast ')
83
84
85 %Entrada rampa partiendo de 60°C hasta 90°C en un lapso de 2 horas
86
87 t0=15*60;
88 tf=60*60*2+15*60;
89 f0=60;
90 f_2=90;
91 t=0:1.5:4*60*60;
92 f=0*(t<t0)+(((f_2-f0)/(tf-t0))*(t-t0)+f0).*(t >=15*60).*(t <=tf)+f_2*(t>tf);
93 D=zeros(size(t));
94 f=[f; ...
95     D];
96 figure
97 [f_y,tOut,x]=lsim(T,f,t, 'b');
98 plot (tOut,f_y)
99 hold on
100 plot (t,f(1,:), 'k')
101 grid on
102 [f_y,tOut,x]=lsim(Tpi,f,t);
103 plot (tOut,f_y, 'r--')
104 title( 'Respuesta ante una funcion rampa ')
105 ylabel( 'Temperatura (°C)')
106 xlabel( 'tiempo (s)')
107 axis([0 15000 0 95])

```

## H. Simulación de la respuesta del sistema a diversas entradas

---

```
108 legend( 'Predictor Smith ', 'Referencia ', 'Controlador PI ', 'Location ', 'southeast ')
```

# Anexo I

## Relación control vs concentración

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 %% Funcion de transferencia de una sistema con retardo
5 s = tf ( 's' );
6 P = exp (-600 * s) * (0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
7 P.InputName = 'u' ;
8 P.OutputName = 'y' ;
9 % Respuesta escalon de la funcion de trasferncia
10
11 figure();step(P), grid on
12 %% Sintonizacion de PID de una funcion de tranferencia con retardo
13 Cpi = pidtune(P,pidstd(1,1),1/1200);
14 % Lazo cerrado de control con realimentacion unitaria
15
16 Tpi = feedback([P*Cpi,1],1,1,1); % closed -loop model [ysp;d]->y
17 Tpi.InputName = { 'ysp' 'd'};
18
19 %% Predictor smith
20 % Filtro pasa bajas de primer orden con constante de 2seg utilizado para
21 %el predictor smith
22
23 F = 1/(20*s+1);
24 F.InputName = 'dy';
25 F.OutputName = 'dp';
26
```

## I. Relación control vs concentración

---

```
27 % Funcion de transferencia del proceso
28 P.InputName = 'u';
29 P.OutputName = 'y0';
30
31
32
33 % Modelo del predictor
34 Gp =(0.0005086/0.000515) / ((1/0.000515)*s+1);
35 Gp.InputName = 'u';
36 Gp.OutputName = 'yp';
37
38 Dp = exp(-600 * s);
39 Dp.InputName = 'yp'; Dp.OutputName = 'y1';
40
41 % Planta general
42 S1 = sumblk( 'ym = yp + dp');
43 S2 = sumblk( 'dy = y0 - y1');
44 Plant = connect(P,Gp,Dp,F,S1,S2, 'u','ym');
45
46 % Diseño de control PI con 0.08 rad/s bandwidth and 90 degrees phase margin
47 Options = pidtuneOptions( 'PhaseMargin ',90);
48 C = pidtune(Plant,pidstd(1,1),1/1200,Options);
49 C.InputName = 'e';
50 C.OutputName = 'u';
51
52 % Ensamble del modelo de bucle cerrado de [y_sp,d] para y
53 Sum1 = sumblk( 'e = ysp - yp - dp');
54 Sum2 = sumblk( 'y = y0 + d');
55 Sum3 = sumblk( 'dy = y - y1');
56 T = connect(P,Gp,Dp,C,F,Sum1,Sum2,Sum3,{ 'y_sp','d'},'y');
57 %% Simulacion multiples escalones
58
59 %Entrada escalon con redefinicion de la amplitud del escalón
60
61 t=0:1.5:4*60*60;
62 f=100*ones(size(t));
63 D=zeros(size(t));
64
65 f=[f; ...
66     D];
67
68 [f_y,tOut,x]=lsim(T,f,t, 'b');
```

```

69 plot (tOut,f_y)
70 hold on
71 plot (t,f(1,:), 'k')
72
73 grid on
74 title( 'Respuesta escal ón (100 °C)')
75 ylabel( 'Temperatura (°C)')
76 xlabel( 'tiempo (s)')
77 axis([0 14000 0 105])
78
79 legend( 'Predictor Smith ', 'Referencia ', 'Location ', 'southeast ')
80
81 a1 = 0.1425;
82 b1 = 78.16;
83 c1 = 0.241;
84 a2 = 99.07;
85 b2 = 47.02;
86 c2 = 14.01;
87 a3 = 0.06128;
88 b3 = 86.38;
89 c3 = 7.5;
90
91 Xa=(a1*exp(-((f_y-b1)/c1).^2)+a2*exp(-((f_y-b2)/c2).^2)+a3*exp(-((f_y-b3)/c3).^2)).*(78.38<f_y).*(f_y<100);
92 figure()
93 plot (tOut/60,Xa)
94 hold on
95 plot (tOut/60,f_y/100)
96
97
98 grid on
99 title( 'Respuesta escal ón (100/100 °C)')
100 ylabel( 'Concentraci ón (Xa)')
101 xlabel( 'tiempo (min)')
102 legend( 'Concentraci ón molar ', 'Temperatura °C/100 ', 'Location ', 'southeast ');
103 hold off
104 %%
105 t=0:1.5:4*60*60;
106 f=80*ones(size(t));
107 D=zeros(size(t));
108 f=[f; ...
109     D];
110 [f_y,tOut,x]=lsim(T,f,t, 'b');

```

## I. Relación control vs concentración

---

```
111
112 Xa=(a1*exp(-((f_y-b1)/c1).^2)+a2*exp(-((f_y-b2)/c2).^2)+a3*exp(-((f_y-b3)/c3).^2)).*(78.38<f_y).*(f_y<100);
113 figure()
114 plot(tOut/60,Xa)
115 hold on
116 plot(tOut/60,f_y/100)
117 grid on
118 title('Respuesta escalón (80/100 °C)')
119 ylabel('Concentración (Xa)')
120 xlabel('tiempo (min)')
121 legend('Concentración molar','Temperatura °C/100','Location','southeast');
122 hold off
123
124 %%
125 t=0:1.5:4*60*60;
126 f=78.38*ones(size(t));
127 D=zeros(size(t));
128 f=[f; ...
129     D];
130 [f_y,tOut,x]=lsim(T,f,t,'b');
131
132 Xa=(a1*exp(-((f_y-b1)/c1).^2)+a2*exp(-((f_y-b2)/c2).^2)+a3*exp(-((f_y-b3)/c3).^2)).*(78.38<f_y).*(f_y<100);
133 figure()
134 plot(tOut/60,Xa)
135 hold on
136 plot(tOut/60,f_y/100)
137 grid on
138 title('Respuesta escalón (78.38/100 °C)')
139 ylabel('Concentración (Xa)')
140 xlabel('tiempo (min)')
141 legend('Concentración molar','Temperatura °C/100','Location','southeast');
142 hold off
```

XX



# Anexo J

# Artículo

REVISTA (2020) 6 (7), 30-34. ISSN 2395-8510



Contenido disponible en <http://www.iteshu.edu.mx/conamti/>

## CONAMTI 2020

Mecatrónica-Energías Renovables-Sistemas Computacionales-Innovación Agrícola

### Estudio de la Concentración en Amortiguamiento de Fluidos

Trejo Jiménez P.Y<sup>1</sup>, Yáñez-Chávez J.E<sup>1</sup>, Guadarrama-Ramírez E<sup>1</sup>,  
Ventura-Cruz I<sup>1</sup> y Olguín-Camacho J<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>División de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido El Saucillo, Huichapan, Hidalgo, México 42411. \*jolguin@iteshu.edu.mx

#### ARTÍCULO

Aceptado septiembre 2020

#### Palabras clave:

Frecuencias de oscilación,  
amplitudes dominantes,  
excitaciones-dinámicas,  
concentración, mezcla, alcohol

#### RESUMEN

El presente trabajo reporta el análisis del grado de concentración de una mezcla de alcohol y agua a partir de las señales provocadas por un movimiento oscilatorio dentro del fluido. Las señales son procesadas por medio de la transformada rápida de Fourier con el fin de obtener las frecuencias de oscilación y las amplitudes dominantes. Se realizaron un conjunto de pruebas mediante un mapeo de frecuencias utilizando un dispositivo vibratorio, el cual fue ubicado dentro de un recipiente lleno de un líquido a diferentes concentraciones, montado a su vez sobre una mesa oscilatoria. La adquisición de datos se realizó utilizando un acelerómetro, conectado a una tarjeta Arduino, la cual procesa la información para su posterior análisis en frecuencia mediante el uso del software Matlab donde se caracterizó la respuesta en vibración de las diferentes concentraciones, teniendo en cuenta la frecuencia natural y la amplitud en esta. Obteniendo una ecuación que representa el comportamiento del fluido, esto mediante un ajuste de la curva resultante, proporcionando un método que permite identificar las concentraciones existentes dentro de un fluido por medio de las oscilaciones producidas en este.



**REVISTA**

2020

ISSN: 2395-8510

**CONAMTI**

Número 6

El Saucillo, Huichapan, Hgo. a 23 de Octubre del 2020.

**ESTIMADOS (AS):**

**Trejo Jiménez P.Y.  
Yáñez-Chávez J. E.  
Guadarrama-Ramírez E.  
Ventura-Cruz I.  
Olguín-Camacho J.**

El Comité Organizador de CONAMTI® 2020, tiene a bien comunicarle que su artículo "**Estudio de la Concentración en Amortiguamiento de Fluidos**", ha sido aceptado para ser publicado en La Revista Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola Sustentable, CONAMTI 2020 en el Vol. 6, No. 6 con ISSN: 2395-8510, con el arbitraje realizado por pares.

Es necesario atender lo siguiente:

1. Anexar carta de Sesión de derechos de autor (formato anexo).

Agradecemos su participación y esperamos seguir contando con su interés para participar en las próximas ediciones. Sin más por el momento quedamos a sus órdenes para cualquier aclaración en el correo: [conamti@iteshu.edu.mx](mailto:conamti@iteshu.edu.mx).

**Atentamente**

**Comité Editorial de la revista**

[www.iteshu.edu.mx/conamti](http://www.iteshu.edu.mx/conamti)  
[conamti@iteshu.edu.mx](mailto:conamti@iteshu.edu.mx)  
761 7248080

# Anexo K

## Ponencias en congresos

EDUCACIÓN

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL OCCIDENTE DEL ESTADO DE HIDALGO

Secretaría de Educación Pública Hidalgo

CONAINTE

5º CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

**EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL OCCIDENTE DEL ESTADO DE HIDALGO**

Otorga la presente

**CONSTANCIA**

A: **Rivera-Olvera, Mayra; Yáñez-Chávez, Jesús Eduardo; Pérez-Hernández, Hugo César y; Olguín-Camacho, Juan**

Por impartir la ponencia en modalidad oral "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN EN AMORTIGUAMIENTO DE FLUIDOS" en el marco del 5to. Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, realizado los días 23, 24 y 25 de octubre de 2019.

Mixquiahuala de Juárez, Hgo., 24 de octubre 2019

  
**Mtro. Luis Armando Officer Arteaga**  
Director General

S.E.P.  
Dirección de Institutos Tecnológicos Descentralizados  
Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo  
18MSU0001S  
Dirección General



EDUCACIÓN



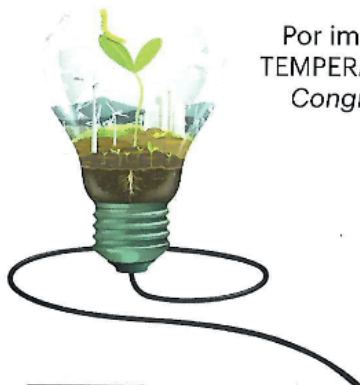
5º CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE  
**EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL OCCIDENTE DEL ESTADO  
DE HIDALGO**

Otorga la presente

## CONSTANCIA

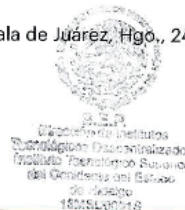
A: **Uribe-Sánchez Aarón, Nava-Ramírez Luis Ángel,  
Iturbide-Chávez Jorge Daniel y Olguín-Camacho Juan**

Por impartir la ponencia en modalidad oral "DESARROLLO DE UN CONTROL DE TEMPERATURA APLICADO EN UN PROCESO DE DESTILACIÓN" en el marco del 5to. Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, realizado los días 23, 24 y 25 de octubre de 2019.



Mixquiahuala de Juárez, Hgo., 24 de octubre 2019

  
**Mtro. Luis Armando Officer Arteaga**  
Director General



## Anexo L

# Presentación de poster

The certificate is framed with a blue border. At the top left is the CONAMTI 2020 logo. At the top right are the logos of the National Technological Institute of Mexico and the State of Hidalgo. The main text is centered and reads: 'EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN OTORGA EL PRESENTE RECONOCIMIENTO A: Olguín-Camacho J.' Below this is a paragraph of text: 'Por su participación en la exposición de posters con el tema "Análisis del efecto de la concentración en amortiguamiento de fluidos" en el marco del Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola CONAMTI 2020, celebrado del 14 al 17 de octubre de 2020, modalidad virtual.' The date and location are given as 'El Saucillo Huichapan, Hgo., a 17 Octubre 2020.' A signature of Mtro. Sergio Quintanar García is present, followed by his name and title: 'Mtro. Sergio Quintanar García, Jefe de la División de Ingeniería Mecatrónica'. At the bottom left are logos of various institutions including UNAM, INR, and CICEC. At the bottom right is the 20th anniversary logo of IITESHU Superior de Huichapan.

 **X** Congreso Nacional de Mecatrónica,  
Tecnologías de la Información,  
Energías Renovables e Innovación Agrícola

**EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN**

OTORGA EL PRESENTE

**RECONOCIMIENTO**

**A: Olguín-Camacho J.**

Por su participación en la exposición de posters con el tema “**Análisis del efecto de la concentración en amortiguamiento de fluidos**” en el marco del **Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola CONAMTI 2020**, celebrado del 14 al 17 de octubre de 2020, modalidad virtual.

El Saucillo Huichapan, Hgo., a 17 Octubre 2020.



**Mtro. Sergio Quintanar García**  
Jefe de la División de Ingeniería Mecatrónica



# Anexo M

## Proyectos financiados

### INFORMES TÉCNICOS

#### INFORMACIÓN BÁSICA DEL PROYECTO

Título: Control para la destilación azeotrópica de etanol carburante  
Convocatoria: Convocatoria 2020: Proyecto de INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
Responsable: OLGUIN-CAMACHO, JUAN  
Modalidad: Por licenciatura  
Sometido: 2020-01-17 10:35:40  
Dictamen: Aprobado con financiamiento el 2020-05-19 19:56:55 [Ver detalle]

S

Descripción	Periodo de actividades a reportar	Periodo recepción de informe	# Entregas	Fecha de informe enviado
● <a href="#">Primer informe parcial</a>	01/01/2020 → 30/04/2020	16/05/2020 → 31/05/2020	1	29/05/2020 21:58:47
● <a href="#">Segundo informe parcial</a>	01/05/2020 → 31/08/2020	16/09/2020 → 30/09/2020	1	29/09/2020 02:31:04
● <a href="#">Informe final</a>	01/01/2020 → 31/12/2020	01/01/2021 → 31/01/2021	1	28/01/2021 15:52:06





## Anexo N

# Proyectos sometidos

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN MEZCLAS HOMOGÉNEAS DE DOS ELEMENTOS MEDIANTE DISPOSITIVOS PROGRAMABLES

### INFORMACIÓN BÁSICA DEL PROYECTO

Convocatoria: Convocatoria 2021: PROYECTOS DE DESARROLLO TECNOLÓGICO E INOVACIÓN

Responsable: VENTURA-CRUZ, IGNACIO

Modalidad: Ninguna

Sometido: 2021-01-28 00:33:58



# Referencias

- Aguirre-Maridueña, L. B., Salcedo-Ponton, C. B. & Neira-Melendez, J. R. (2018), Diseño e implementación de un método de destilación de hexano basado en un sistema de calentamiento por inducción con control PID y monitoreo en línea a través de una página web, Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana Ecuador.
- Alcoholes, C.-B. (2020), 'Centro mexicano de innovación en bioenergía, clúster de biocombustibles lignocelulósicos para el sector autotransporte'.  
URL: <https://cemiebioalcoholes.org/proyecto/>
- ASTM- D5798-19b (2019), 'Specification for ethanol fuel blends for flexible-fuel automotive spark-ignition engines'.
- ASTM-D4806-19a (2019), 'Astm d4806 - 19a: Specification for denatured fuel ethanol for blending with gasolines for use as automotive spark-ignition engine fuel'.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) y Secretaría de Energía (Sener) (2006), 'Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México'.
- Baylak, T., Kumar, P., Niu, C. H. & Dalai, A. (2012), 'Ethanol dehydration in a fixed bed using canola meal', *Energy & Fuels* **26**(8), 5226–5231.
- Becerra-Pérez, L. A. (2009), 'La industria del etanol en México', *Economía UNAM* **6**(16), 82–98.
- Branco, R. H. R., Serafim, L. S. & Xavier, M. R. B. (2018), 'Second generation bioethanol production: On the use of pulp and paper industry wastes as feedstock', *Fermentation* **5**(4), 2–30.
- Brown, C. J. (2009), 'Ethanol distillation with distillers soluble solids recovery apparatus', CA2518809C .  
URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/60/0a/be/ca160e92238011/CA2518809C.pdf>
- Camara de Diputados (1917), 'Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos'.
- Camara de Diputados (2003), 'Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética'. H. Congreso de la Unión.

- Camara de Diputados (2008), 'Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos'. H. Congreso de la Unión.
- Cerquera, A. S. & Acosta, C. A. C. (2016), 'Separación de una mezcla binaria etanolagua en columna de destilación de platos UDCC por densimetría', *Revista Ontare* **3**(2), 161.
- Comision Federal de Competencia Económica (2019), 'Transición hacia mercados competidos de energía: Gasolinas y diésel'. URL: <https://www.cofece.mx/wp-content/uploads/2019/01/CPC-GasolinasyDiesel-30012019.pdf>
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., Stromman, A., Suh, S. & Masera, O. (2014), 'Bioenergy and climate change mitigation: an assessment', *GCB Bioenergy* **7**(5), 916–944.
- Dai, X., Ye, Q., Yu, H., Suo, X. & Li, R. (2015), 'Design and control of dividing-wall column for the synthesis of n-propyl propionate by reactive distillation', *Industrial & Engineering Chemistry Research* **54**(15), 3919–3932.
- Dale, V. H., Efroymson, R. A., Kline, K. L. & Davitt, M. S. (2015), 'A framework for selecting indicators of bioenergy sustainability', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **9**(4), 435–446.
- Das-Neves, M. A., Kimura, T. & Shimizu, N. (2007), 'State of the art and future trends of bioethanol production', *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology* .
- Dávila-Tapia, S. F. (2013), *Diseño de un sistema de control neuronal para el monitoreo y control de calidad en una columna de destilación*, Master's thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Edenhofer, O., Madruga, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S. & Stechow, C. (2012), *Renewable energy sources and climate change mitigation*, Technical report, Cambridge University Press.
- Evanko, W. A., Eyal, A. M., Glassner, D. A., Miao, F., Aristidou, A. A., Evans, K., Gruber, P. R. & Hawkins, A. C. (2012), 'Recovery of higher alcohols from dilute aqueous solutions', US8304588B2 . URL: <https://patents.google.com/patent/US8304588B2/en?q=US8304588B2>
- Fernández-Hernández, C. A. (2013), *Control predictivo basado en modelo (MPC) de una columna de destilación binaria para la producción de etanol*, techreport, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Fitatá-Bojacá, M. M. (2018), *Diseño e implementación de un control de nivel en el fondo de la primera columna de la torre de destilación continua binaria en el centro de investigación en procesos de ingeniería*, Technical report, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería Departamento de Ingeniería Bogotá.

- 
- Galbe, M., Wallberg, O. & Zacchi, G. (2013), *Separation and Purification Technologies in Biorefineries*, John Wiley and Sons Inc.
- Garcá-Bustamante, C. A. & Masera-Cerutti, O. (2016), Estado del arte de la bioenergía en México, Technical report, Red Temática de Bioenergía (RBT) del Conacyt.
- García, C. A., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F. & Masera, O. (2015), ‘Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **43**, 545–552.
- García-Jaimes, L. E. & Rodríguez-Acevedo, J. D. (2016), ‘Optimización de los lazos de control de una torre de destilación mediante las librerías del controlador AC800M’, *Revista Politécnica* **12**(22), 21–32.
- Ghosh, T. K. & Prelas, M. A. (2011), *Energy Resources and Systems*, Springer Netherlands.
- Gil, J. D., Berenguel, M. & Roca, L. (2016), Aportaciones, in ‘XIV Simposio CEA de Ingeniería de Control’, pp. 1–6.
- Gil, J. D., Gómez, J. M. & Rodríguez, G. (2012), ‘Control of an extractive distillation as process to dehydrate ethanol using glycerol entrainer’, *Computers and Chemical Engineering* **39**, 139 – 142.
- Gil, J. D., Ruiz-Aguirre, A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M. & Guzmán, J. L. (2015), Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar parte 1: esquemas, in C. E. de Automática de la IFAC, ed., ‘Actas de las XXXVI Jornadas de Automatica’.
- Gobierno de la República (2013), ‘Plan nacional de desarrollo 2013-2018: Programa sectorial de energía’.  
URL: [https://transparencia.energia.gob.mx/rendicion\\_cuentas/archivos/PROSENER.pdf](https://transparencia.energia.gob.mx/rendicion_cuentas/archivos/PROSENER.pdf)
- Gobierno de la República (2019), ‘Plan nacional de desarrollo 2019-2024’.  
URL: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019)
- Horta-Noriega, L. A. (2006), ‘Ethanol an etbe production and end-uso en México’.
- Karimi, S., Yarak, M. T. & Karri, R. R. (2019), ‘A comprehensive review of the adsorption mechanisms and factors influencing the adsorption process from the perspective of bioethanol dehydration’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **107**, 535–553.
- Kazi, F. K., Fortman, J. A., Anex, R. P., Hsu, D. D., Aden, A., Dutta, A. & Kothandaraman, G. (2010), ‘Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover’, *Fuel* **89**, S20–S28.
- Kiss, A. A. & Suszwalak, D. J. P. C. (2012), ‘Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation involving wall columns’, *Separation and Purification Technology* **70**, 70–78.
-

- Lauzurique-Guerra, Y., de Cárdenas, L. Z., Pérez-Ones, O. & Molina-Rivero, G. (2017), 'Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación', *DYNA* **84**(200), 185–192.
- Luo, H., Liang, K., Li, W., Li, Y., Xia, M. & Xu, C. (2014), 'Comparison of pressure-swing distillation and extractive distillation methods for isopropyl alcohol/diisopropyl ether separation', *Industrial & Engineering Chemistry Research* **53**(39), 15167–15182.
- Mathworks (2020), 'Control of processes with long dead time: The smith predictor'.  
URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/control-of-processes-with-long-dead-time-the-smith-predictor.html>
- Nguyen, Q. A. (2014), 'Procedimientos de producción de etanol y coproductos a partir de biomasa celulósica', ES2458554T3 .  
URL: <https://patents.google.com/patent/ES2458554T3/es?q=ES2458554T3>
- Ornelas-Martínez, S. & Cabrera-Ruiz, J. (2018), 'Análisis comparativo de estrategias de control retroalimentado para esquemas de destilación reactiva', *Revista de Divulgación Científica Jóvenes en la Ciencia* **4**(1), 3347–3351.
- Ortiz-Torres, G., Escobar, R., Adam-Medina, M., Astorga-Zaragoza, C. & Guerrero-Ramírez, G. (2016), 'Control tolerante a fallas activo en sensores y actuadores: Aplicación a una columna de destilación', *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* **13**(1), 67–79.
- Peréz-Nuñez, F. J., Zavala-Villalpando, J. G. & Montoya-Vallejo, O. M. (2018), 'Sintonización de lazo de control de temperatura en el hervidor de una columna de destilación', *Pistas Educativas* **40**(130), 1812–1829.
- Pérez-Ones, O., Díaz-Rodríguez, J., Zumalacárregui, L. & Gozá-León, O. (2010), 'Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (ii)', *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* **52**(52), 62–74.
- Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta (2019), 'Anexo 1: Guía del trl'.  
URL: [https://www.conacyt.gob.mx/PDF/Conv\\_19-1\\_PENTA.pdf](https://www.conacyt.gob.mx/PDF/Conv_19-1_PENTA.pdf)
- REMBIO (2011), 'La bioenergía en México: Situación actual y perspectivas'.  
URL: <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2020/12/CT4.pdf>
- REN21 (2019), *Renewables 2019 global status report*, Technical report, Renewable Energy Policy Network For The 21st Century, Paris: REN21 Secretaría.
- Romero-Hernández, O., Masera, O., S., R. & Grunstein, M. (2011), 'Legal and institutional frameworks at national and subnational levels for biofuel promotion in México', Center for International Forestry Research (CIFOR) .

- Rowe, S. C., Hischer, I., Palumbo, A. W., Chubukov, B. A., Wallace, M. A., Viger, R., Lewandowski, A., Clough, D. E. & Weimer, A. W. (2018), 'Nowcasting, predictive control, and feedback control for temperature regulation in a novel hybrid solar-electric reactor for continuous solar-thermal chemical processing', *Solar Energy* **174**, 474–488.
- SENER (2014), 'Análisis y propuesta para la introducción de etanol anhidro en las gasolinas que comercializa PEMEX'.  
URL: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/86229/Bibliograf\\_a\\_9.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/86229/Bibliograf_a_9.pdf)
- SENER (2015), 'Centros mexicanos de innovación en energía'.  
URL: [urlhttps://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia](https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia)
- SENER (2016), 'Actualización de la primera estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios, en términos de la ley de transición energética'.
- SENER (2017), Balance nacional de energía, Technical report, Secretaría de Energía.  
URL: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf)
- SENER (2018), 'Lineamientos para las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros'.  
URL: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5541659](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5541659)
- Solomon, B. D. & Bailis, R., eds (2014), *Sustainable Development of Biofuels in Latin America and the Caribbean*, Springer New York.
- Torres-Figuero, J. J. (2014), *Metodología de control óptimo y control predictivo óptimo en columnas de destilación extractiva, orientados económicamente*, techreport, Universidad de los Andes.
- Villacres-Guijarro, G. E. (2011), *Automatización y puesta en marcha de una columna de destilación continua de platos perforados tipo experimental para el sistema etanol - agua mediante un PID y plataforma Labview denominada (UDCC)*, Master's thesis, Universidad de Guayaquil.
- Wei, H.-M., Wang, F., Zhang, J.-L., Liao, B., Zhao, N., kui Xiao, F., Wei, W. & Sun, Y.-H. (2013), 'Design and control of dimethyl carbonate–methanol separation via pressure-swing distillation', *Industrial & Engineering Chemistry Research* **52**(33), 11463–11478.
- Weitkamp, J., Ernst, S., Günzel, B. & Deckwer, W.-D. (1991), 'Separation of gaseous water/ethanol mixtures by adsorption on hydrophobic zeolites', *Zeolites* **11**(4), 314–317.
- Wu, Y. C., Lee, H. Y., Huang, H. P. & Chien, I. L. (2014), 'Energy- saving dividing-wall column design and control for heterogeneous azeotropic distillation system', *Industrial and engineering chemistry research* **53**, 1537–1552.