



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero en Automática

Autor

Jairo Guillermo Jiménez Toirac

Tutor

Ing. Ewar Altarriba Massó

Consultantes

Dr.C. Deynier Montero Góngora

Ing. Néstor William Jiménez Ferrer

Noviembre, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE RECTIFICACIÓN II EN LA
INDUSTRIA “DESTILERÍA 8 DE MARZO”**

.

Autor

Jairo Guillermo Jiménez Toirac

Tutor

Ing. Ewar Altarriba Massó

Noviembre, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Dedicatoria

- A Dios por su fidelidad y todo lo que representa para mí.
- A mi esposa Yelenis Noa, que me ha dado el soporte y ejemplo de que sí se puede.
- A mi madre por su continuo apoyo en la cimentación de mi estructura moral y profesional.
- A mi papá por todo el esfuerzo y sacrificio dedicado.
- .A mi hermana Helen.
- A mi familia en general que amo tanto.

Agradecimientos

Luego de culminado este trabajo llega quizás la parte más difícil, los agradecimientos, pues son tantas las personas que han influido en mi formación académica y social que sería injusto omitir alguna de estas:

- ✓ Muy especial a ese que todo lo puede (Dios).
- ✓ A mi esposa por todo su amor y motivación durante todo este período de estudios.
- ✓ A mis padres Isvel Toirac Cantillo, Ovidio Miguel López Moreno por sus excelentes y oportunos consejos.
- ✓ A mi padre y tutor Ing. Néstor William Jiménez Ferrer por su dedicación y horas de desvelo en la construcción del proyecto de tesis.
- ✓ A mi tutor Ing. Ewar Altarriba Massó por su dedicación y preocupación constante.
- ✓ Al Dr.C. en Automática Deynier Montero Góngora, por su significativo aporte a la investigación en el proceso de identificación.
- ✓ A Robert y Álvaro, por su sincera amistad y por acompañarme en los buenos y malos momentos en nuestra estancia en Santiago de Cuba.
- ✓ A los compañeros de la empresa “UE Urbano Noris Cruz” que me facilitaron el acceso a la información y el desarrollo del componente experimental, especialmente a los del Grupo de Automática. A todos los miembros del grupo técnico: fundamentalmente al Ing. Norlis Rojas Torres.

LISTADO DE SÍMBOLOS, TÉRMINOS ESPECIALES Y ABREVIATURAS NO NORMALIZADAS

\$: Pesos cubanos.

C.A.I.: Complejo agroindustrial.

°C: Grados Celsius.

CDE: Circuito de enfriamiento de destilación.

CO₂: Dióxido de carbono.

Ej: Ejemplo.

etc: Etcétera.

Fe: Flujo de entrada.

FIC: control indicador de flujo.

Fs: Flujo de salida.

GL: Por ciento en volumen o grados de Josseph Gay-Lussac.

h: Hora.

hL/día: Hectolitro (100 L)/día.

Let/m³h: Litros de etanol por metro cúbico de volumen del fermentador en una hora.

LIC: Control indicador de Nivel.

m: Metro.

mA: miliamperio.

Min: minutos.

mm: Milímetros.

pH: Potencial hidrógeno (medida de acidez o alcalinidad).

TBX: ejercicio y mantenimiento de equipo.

TIC: Control indicador de temperatura.

TT: Transistor de temperatura

UE: Unidad Empresarial

V: Válvula.

XV: 15

XVI: 16

XVII: 17

LISTADO DE IMÁGENES

Figura 1. Componente de la destilación.	10
Figura 2. Diagrama de composición de una torre de Destilación-Rectificación.....	11
Figura 3. Esquema por etapas de la Destiladora “8 de Marzo”.	13
Figura 4. Esquema básico de Destilación Alcohol Técnico.	17
Figura 5. Etapa de rectificación II.	18
Figura 7. Esquema del modelo lineal.	27
Figura 6. Esquema del proceso de identificación experimental.....	27
Figura 8. Variables consideradas en el proceso.....	31
Figura 9. Comportamiento de temperatura y presión en el experimento 1.....	34
Figura 10. Prueba de residuos para el modelo estimado en el experimento 1.	35
Figura 11. Salida real menos salida del modelo simulado en el experimento 1.	36
Figura 12. Mapa de polos y ceros del modelo simulado en el experimento 1.	36
Figura 13. Comportamiento de temperatura y presión en el experimento 2.....	37
Figura 14. Prueba de residuos para el modelo estimado en el experimento 2.....	38
Figura 15. Salida real menos salida del modelo simulado en el experimento 2.....	38
Figura 16. Mapa de polos y ceros del modelo simulado en el experimento 2.....	39
Figura 17. Simulación en el matlab simulink para diferentes configuraciones de control.....	40
Figura 18. Gráfico del comportamiento del sistema controlado.....	41
Figura 19. Transmisor de presión SITRANS P, Serie DS III, 7MF4*33.....	43
Figura 20. Cabezal de medición para presión relativa.....	43
Figura 21. PT-100 tipo RTD.....	45
Figura 22. Conexión de la PT-100 de 3 hilos.....	46
Figura 23. Estructura de una Válvula de Control.....	48
Figura 24. Diagrama de protocolos de comunicación.....	50
Figura 25. Nivel de automatización de la empresa.....	53

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Rango de operación	30
Tabla 2. Ajustes de los modelos polinómicos	39
Tabla 3. Parámetros de constantes de tiempo para el sistema experimento 1	40
Tabla 4. Parámetros de constantes de tiempo para el sistema experimento 2	40
Tabla 5. Especificaciones técnicas de los transmisores de presión.	42
Tabla 6. Especificaciones de la válvula proporcional	47
Tabla 7. Esquema Funcional del Sistema de Automatización	52
Tabla 8. Costos de materiales	55

RESUMEN

La “Destilería 8 de marzo”, en la industria azucarera, desempeña un rol esencial en el desarrollo económico del municipio San Germán, siendo la única de su tipo en la provincia Holguín. El grado de automatización de la empresa es muchas veces inferior al necesario. Estos aspectos provocan grandes pérdidas de energía, materia prima y una baja calidad del producto final, además los trabajadores se exponen a un mayor esfuerzo y desgaste. Se realiza la identificación experimental del proceso en la torre de Rectificación II, en el C.A.I Urbano Noris Cruz, con la primicia de conocer la dinámica del proceso para su mejor estudio y comprensión. Se explican las técnicas y métodos fundamentales de la identificación así como la señal de entrada para excitar el sistema. Se describen los experimentos que se realizaron, se validan los modelos matemáticos obtenidos y se simulan los mejores parámetros del controlador. Finalmente se realiza una valoración económica y medioambiental de la propuesta técnica.

Palabras claves: automatización, rectificación II, identificación.

ABSTRACT

The "Destilería 8 de Marzo", in the sugar industry, it plays an essential role in the economic development of the municipality of San Germán, being the only one of its kind in the province of Holguín. The degree of automation of the company is many times lower than necessary. These aspects cause large losses of energy, raw materials and a low quality of the final product, in addition to exposing workers to greater effort and wear. The experimental identification of the process is carried out in the Rectification II tower, in the C.A.I Urbano Noris Cruz, with the first objective of knowing the dynamics of the process for its better study and understanding. The fundamental techniques and methods of identification are explained as well as the input signal to excite the system. The experiments that were performed are described, the mathematical models obtained are validated and the best parameters of the controller are simulated. Finally, an economic and environmental assessment of the technical proposal is carried out.

Key-words: *automation, rectification II, identification.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE LA DESTILACIÓN Y LAS TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN.	5
1.1 Materias primas para la obtención de alcohol	5
1.1.1 Materias Primas, Auxiliares y Energéticos.....	5
1.2 Caracterización de la producción de etanol	7
1.2.1 Tipos de fermentación alcohólica	8
1.3 Concepto de la destilación	9
1.3.1 Tipos de columnas de destilación de la industria Urbano Noris.....	11
1.4 La destilación y rectificación del proceso de estudio, principio de funcionamiento. Refinería general	12
1.4.1 Principio de funcionamiento de la destilación.	14
1.4.2 Componentes principales del sistema de destilación	17
1.4.3 Alimentación de la segunda torre de Rectificación.	18
1.5 Propósitos de la automatización.....	19
1.5.1 Control retroalimentado	20
1.5.2 Controlador lógico programable (PLC)	20
1.6 Estado del arte de la modelación matemática.....	21
1.6.1 Modelos paramétricos empleados en sistemas industriales.	23
1.7 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas.	21
1.7.1 Proceso de identificación.....	25
1.7.2 Métodos de identificación	26
1.7.3 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB	28
Conclusiones.....	29
2 CAPÍTULO 2 MODELACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE RECTIFICACIÓN II.....	30
2.1 Modelación y propuesta de control.....	30
2.1.1 Rangos de operaciones del proceso de la segunda etapa rectificación	30
2.2 Requisitos previos a la experimentación	32
2.3 Identificación experimental del caso de estudio	33

2.3.1	Experimento # 1.....	33
2.3.2	Experimento # 2.....	36
2.4	Ajuste de controladores.....	39
2.5	Selección de instrumentos	42
2.5.1	Propuesta del instrumento de medición: Transmisor de presión	42
2.5.2	Transmisores de presión SITRANS P, Serie DS III, 7MF4*33.....	42
2.5.2	Propuesta del instrumento: Transmisor de temperatura	44
2.5.3	Propuesta del instrumento final de control: válvula proporcional	47
2.6	Los Controladores Lógicos Programables (PLC's).....	49
2.6.1	Comunicaciones	49
2.6.2	Ventajas y desventajas de los PLC	51
2.7	Valoración Económica y medioambiental.....	53
2.7.1	Política de Seguridad de la Empresa.....	53
2.7.2	Valoración económica.	54
CONCLUSIONES GENERALES.....		57
RECOMENDACIONES		58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		I
ANEXOS		V

INTRODUCCIÓN

La automatización tiene una importancia estratégica en el sector industrial. Los procesos extractivos representan un desafío en este sentido. El grado de automatización de algunas industrias es muchas veces inferior al necesario. Estos aspectos provocan grandes pérdidas de energía, materia prima y una baja calidad del producto final, disminuyendo la competitividad de las empresas. Además los trabajadores se exponen a un mayor esfuerzo y desgaste.

En un análisis histórico realizado por Ray, W. H. en 1983 [1] se muestra que hasta la década de 1960, prácticamente todo el control de procesos era hecho por controladores analógicos (mecánicos, eléctricos o neumáticos) proyectados para lazos de una entrada y una salida. Las estrategias de control más elaboradas tenían poca aceptación debido a las insuficientes exigencias de protección ambiental y al hecho de que las especificaciones del producto eran menos rigurosas. Mejoras en los sistemas de control, en aquella época, hubiesen elevado los costos de una forma extraordinaria.

Con el amplio desarrollo alcanzado en la última década de los recursos informáticos, con una inversión en la modernización instrumental se alcanzarían altos niveles de producción, con menos gastos de energía y materia prima empleada, disminuyendo los errores en la operación de forma general, buscando siempre ahorro para la empresa. La inversión en la automatización de los procesos aumenta significativamente el rendimiento, permitiendo que técnicas de control más elaboradas puedan ser implementadas. Debido a la gran diversidad de procesos y a cuestiones de política industrial, esas mejorías en la automatización no son difundidas en todas las plantas.

Uno de los problemas fundamentales en las industrias es la búsqueda constante de la eficiencia de los procesos que en ellas tienen lugar. Específicamente la Planta de Destilación “8 de Marzo” en Urbano Noris de Holguín, no escapa de esta problemática. Actualmente presenta gran insuficiencia en la automatización de sus sistemas, pues prácticamente se trabaja de forma manual.

El etanol será dentro de unas décadas el sustituto de los combustibles fósiles. Cuando estos se agoten, los autos funcionarán con la energía del sol, con hidrógeno y con alcohol.

El etanol se obtiene por diversas vías, pero la fundamental es la destilación, que es una de las operaciones unitarias más antiguas y usadas en los procesos industriales. Se lleva a cabo en torres de destilación, las cuales funcionan a presiones prácticamente constantes estando formadas por diferentes etapas de separación llamadas platos [2].

En la destilación alcohólica se obtienen diferentes productos, por el tope de la columna rectificadora entre ellos, los alcoholes volátiles y CO_2 , además del etanol, que se extrae por unos platos más abajo. Por el fondo se obtienen las vinazas.

La Destilería “8 de marzo” de la provincia de Holguín desarrolla su proceso productivo de etanol disponiendo de una tecnología muy sencilla, prácticamente sin sistemas de control automáticos, por lo cual resulta bastante complejo la optimización del proceso. Los alcoholes finos ostentan la mayor pureza, lográndose con la intensificación en la rectificación de los alcoholes técnicos, mientras mayor sea los requerimientos de pureza, más exigentes serán las operaciones del sistema. El mismo, es manipulado en su totalidad por los operarios de la planta, quienes son capaces de mantener una producción constante, a través de la experiencia y auspiciándose con los instrumentos de medición de temperaturas locales y el flujo de alcohol técnico, que se le suministra a la torre rectificadora.

Se toma como situación problemática:

Actualmente, durante la explotación de las torres de rectificación existen conflictos operacionales en el funcionamiento, dentro de los que se destacan:

1. La dificultad para establecer la relación de vapor de agua que pasa por los reductores necesarios y la temperatura de trabajo en el plato 54, donde se incrementan los gastos por consumo energético en detrimento de la eficiencia y la operatividad de la planta.
2. La ausencia de instrumentos de medición y los instrumentos instalados están obsoletos, pueden ser menos precisos y más propensos a fallar, lo que puede

afectar la calidad del producto final y poner en riesgo la seguridad del personal de operación que trae consigo el aumento de accidentes y lesiones.

3. Se desconocen los valores adecuados de flujo volumétrico y presión de vapor de agua que garanticen la estabilidad operacional de la instalación.

Para solucionar las problemáticas anteriores, es necesario modelar los procesos de rectificación II, a través de técnicas de identificación que permitan obtener modelos en funciones de transferencia.

Problema de investigación

Se requieren modelos matemáticos con capacidad explicativa y pronosticadora, que permitan el diseño de estrategias de control en la Destilería “8 de marzo”, C.A.I Urbano Noris, Holguín.

Objeto de la investigación

Proceso de rectificación II en la torre de la Destilería “8 de marzo”.

Campo de la investigación

La modelación y simulación del proceso de rectificación II en la Destilería “8 de marzo”.

Hipótesis

Si se obtuviera el modelo matemático que pudiera caracterizar el proceso de rectificación II en la Destilería “8 de marzo”, se podría estudiar el comportamiento de la temperatura respecto a cambios en la presión de vapor de agua, lo que facilitaría el diseño de estrategias de control automático para aumentar la eficacia y la eficiencia del proceso, con la consecuente disminución del impacto ambiental.

Objetivo general

Obtener modelos matemáticos para el proceso de rectificación II de alcohol fino, que relacionen la temperatura respecto a los cambios de presión de vapor de agua en la alimentación de la torre; para el diseño de estrategias de control con vistas al estudio y simulación del proceso, en la Destilería “8 de marzo”.

Objetivos específicos

1. Analizar las variables que pueden afectar la calidad del producto en la columna rectificadora de alcohol fino.

2. Realizar experimentos para obtener los modelos matemáticos del proceso de rectificación II.
3. Proponer los parámetros óptimos del controlador del sistema utilizando el Matlab.
4. Proponer la instrumentación necesaria para el control de temperatura en la rectificadora II.

Aporte de la investigación:

La identificación experimental permite obtener modelos matemáticos que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema de alcoholes finos, en la empresa Destilería “8 de marzo”, arrojando los siguientes aportes:

1. Modelos lineales en funciones de transferencia, que no requieren recursos computacionales avanzados, abarcan diferentes puntos de operación del proceso y pueden ser empleados en estrategias de control que se insertan en los PLC de la empresa.
2. Diseño de dos programas en el software MATLAB® que facilitan la obtención de los modelos paramétricos.
3. Modelos paramétricos, que reflejan las características dinámicas de la rectificación II con mayor exactitud, aunque requieren una mayor potencia de cálculo, disponible ya en los PLC de la empresa.

Significación Práctica:

Con el desarrollo de esta investigación se da solución y se cubre la necesidad existente de observar el comportamiento dinámico del proceso de la rectificación II para obtener alcohol fino, de la empresa Destilería “8 de marzo”. El estudio de las respuestas obtenidas a partir del modelo identificado, en conjunto con el controlador propuesto para el sistema, le da la facilidad al personal de la empresa, de profundizar sus conocimientos acerca del proceso y le proporcionan una buena predicción de la variable de salida ante diferentes situaciones. Además el modelo servirá para posteriores diseños de estrategias de control e investigaciones que puedan realizarse en este tipo de proceso, brindando al investigador una guía para continuar.

CAPÍTULO 1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE LA DESTILACIÓN Y LAS TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN

Base de la investigación y fundamentos teóricos

El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos presentes en la investigación a realizar.

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico - Metodológico de la Investigación, a partir del análisis de los trabajos precedentes y de la metodología seguida para su ejecución. Se ofrece una caracterización integral de las técnicas de identificación y del proceso de destilación de alcoholes finos en la empresa “UE Urbano Noris Cruz, Holguín”.

1.1 Materias primas para la obtención de alcohol

Los productos que contengan azúcares o los hidratos de carbono que se puedan transformar con facilidad en azúcar fermentable, almidón o celulosa, pueden servir como materiales de partida desde el punto de vista teórico. Su uso práctico estará determinado por el rendimiento en alcohol y por su costo.

1.1.1 Materias Primas, Auxiliares y Energéticos

Insumos Fundamentales:

1) Jugo de Caña:

- Jugo de Filtros Clarificados
- Temperatura: 85 – 95 °C
- Azúcares Reductores Totales: 10 – 10,7 % (100 – 120 g/l)
- Sólidos totales: 11.5 – 12,7 %
- pH: 5,5 – 6,0
- Acidez Volátil (como AcH): < 0,1 %
- Bacterias totales (placas): < 1000 col/ml
- Suministro por bombeo directo desde el Central

2) Miel de Caña

- Miel “B” o de segunda cristalización.
- Azúcares Reductores Totales: 58 - 62 %

- Azúcares infermentables: 2 - 3 %
- Sólidos Totales: 82 – 84 %
- Cenizas: 1 – 2 %
- Temperatura: 25 – 40 °C
- pH: 5,5 – 6,5
- Suministro por bombeo desde los tanques de almacenaje

3) Urea.

4) Fosfato de Amonio.

5) Ácido Sulfúrico.

Insumos auxiliares

1. Nutriente para levaduras.
2. Sosa cáustica.
3. Ácido Fosfórico.
4. Formol.
5. Hipoclorito de Sodio.
6. Cal Hidratada.
7. Antiespumante.

Insumos de utilidades

1. Agua de proceso.
2. Agua tratada.
3. Fuel-Oil.
4. Gas-Oil.
5. Químicos varios.
6. Aire atmosférico.

Insumos energéticos

1. Vapor de baja:
 - Saturado a 0,7 bar.
 - De escape o por reducción de directo y sin atemperación.
2. Vapor vivo:
 - Saturado a 2 bar.
 - Reducido de directo.

3. Electricidad:

- Para fuerza 3 Φ ; 440 V; 60 Hz.
- Para control 1 Φ ; 220 V; 60 Hz.
- Para iluminación y uso general 1 Φ ; 110/220 V; 60 Hz.

El análisis de las diferentes materias primas para obtener alcohol demuestra que entre las materias primas vegetales que pueden ser transformadas en alcohol, la caña de azúcar es la más ventajosa. Con menos toneladas de materias primas obtenemos una mayor cantidad de alcohol; además existen experiencias en este cultivo y posee altos rendimientos.

1.2 Caracterización de la producción de etanol

Fase fermentativa:

Fermentación: “En ausencia de aceptor de electrones, muchos organismos efectúan reacciones redox balanceadas de algunos compuestos orgánicos, con liberación de energía. Este proceso se llama fermentación. Existen diferentes tipos de fermentación, pero en procesos fermentativos solamente se efectúan una oxidación parcial de los átomos de carbono del compuesto orgánico y, por consiguiente, una pequeña cantidad de energía se libera. La oxidación en una fermentación está acoplada a la reducción posterior de un compuesto orgánico generado a partir del catabolismo del sustrato inicial fermentable; así, no se requiere un aceptor de electrones suministrado exteriormente” [11].

En la industria alcoholera se le llama fermentación a la conversión de azúcares en alcohol y dióxido de carbono mediante la acción de una levadura. Para ello se llevan a cabo dos etapas: fase aerobia y anaerobia.

Fermentación aerobia:

El objetivo de esta etapa es lograr la propagación y desarrollo de la biomasa necesaria para garantizar óptimos rendimientos en la etapa de producción de alcohol, propiciando condiciones óptimas al medio de cultivo.

Fermentación anaerobia: Fermentación alcohólica

Se puede definir a la fermentación alcohólica, como el proceso biológico más utilizado por el hombre mediante el cual un azúcar fermentable es transformado en alcohol etílico. El mismo debe durar el menor tiempo posible a fin de obtener un

producto económicamente rentable. La fermentación es la parte más importante del proceso de elaboración de etanol y de la forma como se conduzca depende de que la transformación del azúcar en alcohol sea total; es decir el rendimiento de las materias primas utilizadas sean óptimos [12].

1.2.1 Tipos de fermentación alcohólica

Existen dos tipos de fermentación a nivel industrial: fermentación discontinua y fermentación continua.

Fermentación discontinua: Es un método clásico de cultivo discontinuo, en el cual, el fermentador es inoculado y alimentado con sustrato. El cultivo se lleva a cabo hasta que se agota el sustrato limitante o por acumulación de metabolitos tóxicos [13].

Ventajas: [13]

- Facilidad del control microbiológico, Ej.: limpieza y desinfección de los fermentadores.
- Flexibilidad del proceso.
- No requiere de estricto control de la temperatura, pH, nutrientes, etc.
- Bajo costo de operación, mantenimiento y amortización.

Desventajas: [13]

- Necesidad de constante propagación de la levadura.
- Altos consumos de materias primas y nutrientes en la propagación.
- Fermentaciones muy largas (24 - 32 h).
- Bajas concentraciones de alcohol (6 – 8 %).
- Rendimientos bajos.
- Baja productividad del sistema (1 - 2 L et/ m^3 h). Influyen los tiempos de carga, descarga y limpieza.

Fermentación continua: Se proporciona un alimento continuo de medio fresco y extracción continua de medio fermentado, la fermentación es estable durante semanas y meses. Se cumple que las corrientes de entradas y salidas son iguales a lo largo del tiempo ($F_e = F_s$) por lo que el volumen del tanque se mantiene constante [13].

Ventajas:[13]

- Alta Productividad del sistema ($> 5 \text{ L et/m}^3\text{h}$).
- No existe tiempos de carga, descarga y limpieza.
- Reducción de los costos de instalación (se reducen los fermentadores).
- Fácil automatización del proceso y con menores costos (sistema en estado estacionario y menor número de fermentadores por aumento de volumen). Fácil control analítico y microbiológico del proceso.
- Fermentaciones muy rápidas (8-10 h).
- Altas concentraciones de alcohol (8-10 %).
- Minimiza los consumos de materias primas y nutrientes en la propagación.
- Bajos costos de mantenimiento.
- Distribuir la materia prima en diferentes fermentadores permite mantener bajos niveles de azúcares y altos contenidos de alcohol lo que inhibe el crecimiento de bacterias.

Desventajas:[13]

- El proceso no es flexible. Depende de la estabilidad del suministro y calidad de las materias primas. Cualquier inestabilidad varía el estado estacionario. También influye el control estable de los parámetros de la fermentación, temperatura, pH, aireación, agitación, etc.
- Complejidad del control microbiológico.
- Control de contaminantes y existe degeneración del microorganismos.

1.3 Concepto de la destilación

Es una operación unitaria que permite separar los componentes de una solución, que depende de la distribución de las sustancias entre las fases gaseosa y líquida, aplicable a los casos donde todos los componentes se encuentren presentes en ambas fases. En lugar de introducir una nueva sustancia a la mezcla, para lograr una segunda fase, como se hace en absorción o desorción gaseosa, la nueva fase se crea de la solución original por evaporación o por condensación [14].

Los componentes donde ocurre el proceso antes mencionado, se muestran en la figura 1.

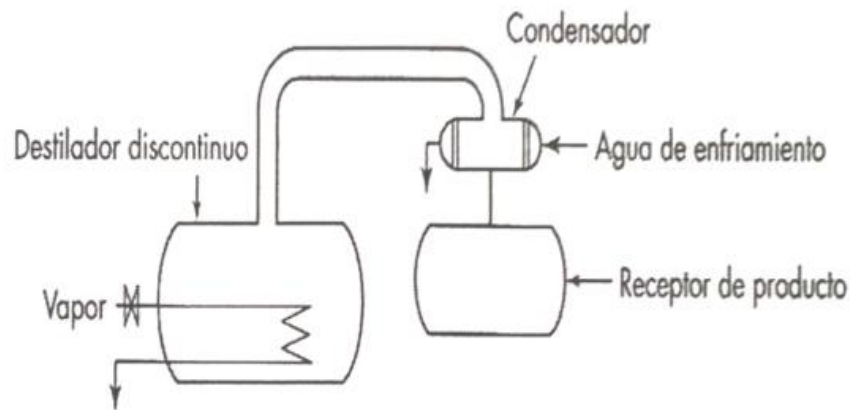


Figura 1. Componente de la destilación.

Tipos de destilación que se implementan en las industrias

Existen dos clases de destilación diferentes en principio: destilación simple y destilación fraccionada o rectificación. El proceso de rectificación destaca por su importancia económica y por ser la más frecuentemente utilizada. En la figura 2 se muestra el esquema general de la clasificación de la destilación [15].

Destilación simple: es la operación de evaporación parcial efectuada una sola vez de la mezcla líquida y la condensación de los vapores formados. Esta es aplicable sólo para separar mezclas, cuya relación entre la volatilidad de sus componentes sea considerable [15].

Destilación fraccionada: La rectificación es la operación de destilación múltiple de evaporación parcial de los líquidos y la condensación de sus vapores. Esta operación se ejecuta por el contacto de los flujos de vapor y de líquido que poseen diferentes temperaturas y se realiza fundamentalmente en la columna de fraccionamiento. En cada contacto del líquido se evaporan principalmente los componentes con menor temperatura de ebullición, con lo cual se enriquecen los vapores y de ellos se condensan esencialmente los componentes con alta temperatura de ebullición, que pasan al líquido [15].

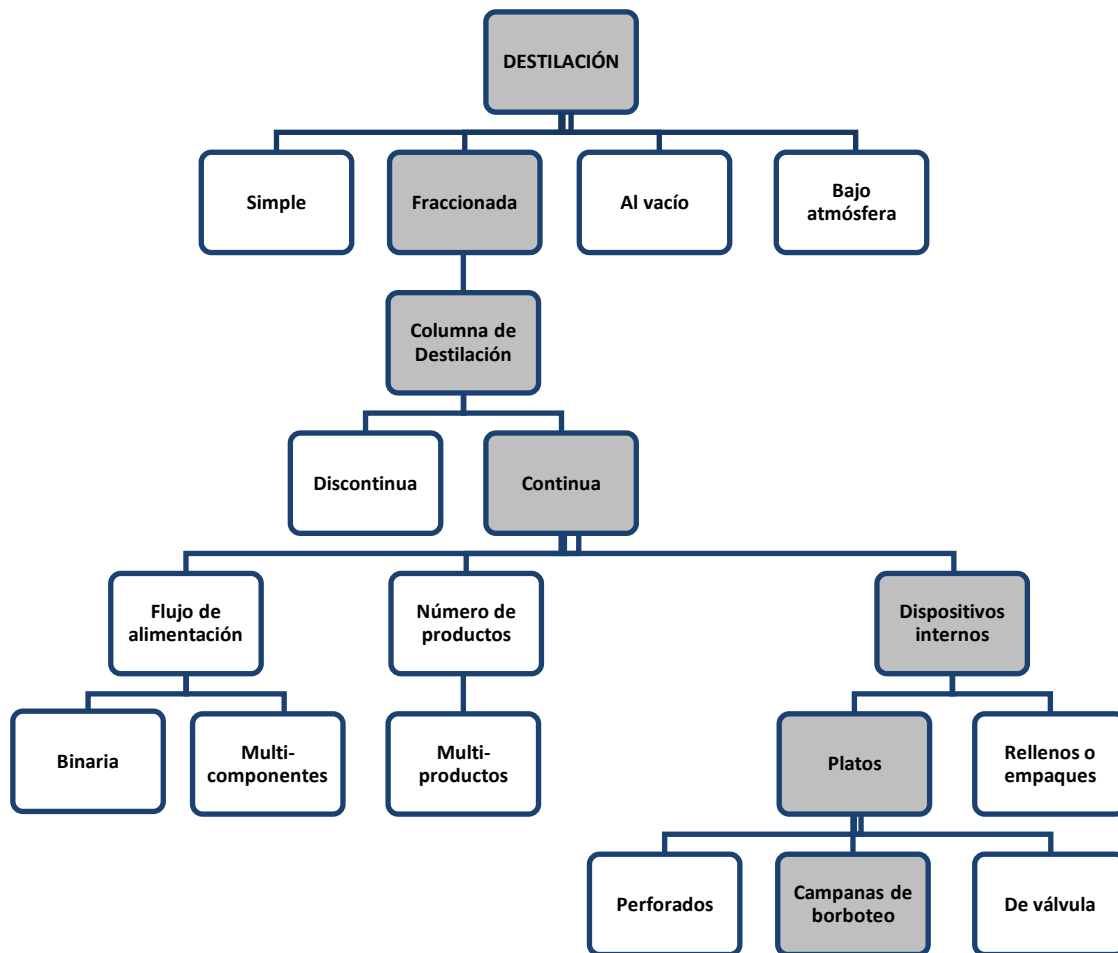


Figura 2. Diagrama de composición de una torre de Destilación-Rectificación.

En principio, una columna de destilación fraccionada proporciona una gran superficie para el intercambio de calor, en las condiciones de equilibrio, entre el vapor ascendente y el condensado descendente. Esto posibilita una serie completa de evaporaciones y condensaciones parciales a lo largo de la columna [16].

1.3.1 Tipos de columnas de destilación de la industria de Urbano Noris

Las columnas de destilación pueden ser de platos o bandejas o de material de relleno.

Las columnas de platos están formadas por bandejas, donde se acumula una determinada cantidad del líquido descendente, el cual es atravesado por el vapor ascendente, dando lugar a la transferencia de masa [17].

Tipos de platos que se utilizan

- Platos con campanas o con sombreretes de burbujeo: construido con una placa que posee un cierto número de orificios, en los cuales están montados los tubos de subida, a través de las cuales pueden ascender los vapores procedentes de los platos inferiores. Cada una de estas salidas de vapores está cubierta por una campana o sombrerete, la cual va sujeta al tubo de subida, según se observa en el anexo 1[17].

1.4 La destilación y rectificación del proceso de estudio, principio de funcionamiento. Refinería general

Diagrama tecnológico de la Destilería “8 de Marzo”

La Destilería “8 de marzo” de la UE Urbano Noris Cruz, Holguín con una capacidad de 300 hl/d, está constituida por nueve procesos principales:

- Recepción y almacenamiento de Miel
- Pasteurización de Miel
- Mezcladores
- Fermentador
- Prefermentadores
- Destilación
- Rectificación I
- Rectificación II
- Almacenamiento

El almacenamiento de la miel se realiza en dos tanques de capacidad de 200 t c/u en fábrica. El primero de ellos alimenta al proceso de pasteurización, la cual se utiliza para la propagación de levadura. Esta mezcla obtenida se transfiere a las unidades de prefermentación.

El jugo de la caña que se utiliza en este proceso, se recibe desde el central. El jugo en caliente es bombeado hacia el mezclador, uniéndose con miel y seguido en el mezclador secundario con agua, a fin de diluir la miel requerida de la mezcla. El mosto como resultado obtenido de la mezcla de jugo de caña y la miel pasan la siguiente fase de la fermentación.

Ambos procesos, el fermentado y la prefermentación; dan lugar a una mezcla final (vino) que es el producto que alimenta a la torre destiladora. En el diagrama de la figura 3 se describe este proceso general, detallando las etapas productivas hasta llegar al producto final.

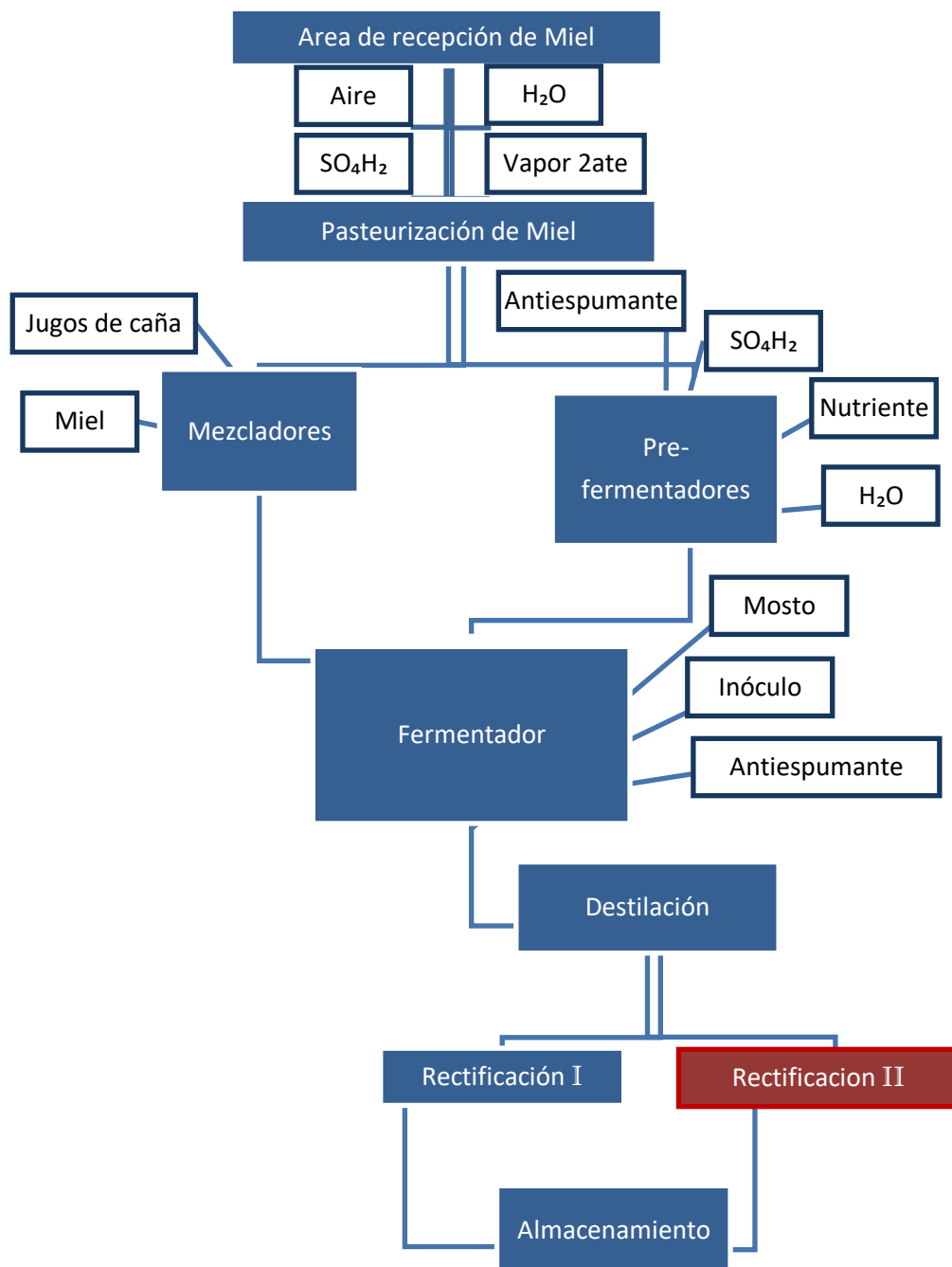


Figura 3. Esquema por etapas de la Destiladora “8 de Marzo”.

1.4.1 Principio de funcionamiento de la destilación

La destilación tiene como objetivo el extraer de una mezcla sus componentes más volátiles, dejándolo completamente agotado. En el caso de la destilación alcohólica, el líquido del que se trata es el vino fermentado, del cual se extrae casi en su totalidad el alcohol que contiene, justamente con los productos más volátiles y algo de agua. Esta mezcla extraída recibe el nombre de flema, llamándose vinazas a la parte del líquido agotada de alcohol, que posee agua, impurezas de cola y materias sólidas contenidas en el vino [18].

El vino procedente del área de fermentación se alimenta mediante bombas hacia el calentavinos primario para elevar su temperatura en unos 30 °C. Una vez alcanzado este parámetro, a su salida es introducido en el calentavinos secundario o recuperador de calor, que eleva su temperatura en unos 10 °C adicionales. Seguidamente pasa a ser desgasificado en la columna de desgasificación o desgasificador, cuyo proceso elimina los gases disueltos en el vino, en el que se podrá inyectar una mínima cantidad de vapor para contribuir aún más al desprendimiento del gas carbónico. Los vapores del desgasificador, como son impuros, pasan directamente al condensador de cabezas o en su defecto a uno específico para ese fin.

La destilación consiste en evaporar un líquido, llevándolo a ebullición, seguida de la condensación de los vapores producidos para transformarlo en otro líquido, cuya concentración difiere, en general, de la del líquido primitivo. La tensión de vapor que despiden los líquidos crece a medida que la temperatura de este aumenta. Si se calienta a presión constante (por ejemplo a presión atmosférica) un compuesto puro en estado líquido, llega un momento en que la tensión de su vapor se iguala a la presión atmosférica, y en este preciso instante, entra en ebullición. Si se continúa calentando durante un espacio de tiempo suficiente, será transformado en vapor, conservando durante toda la variación una temperatura constante, esta temperatura es denominada temperatura de ebullición [19].

En la columna destiladora es donde ocurre este principio. El vino desgasificado se introduce en la destrozadora a través de una sifa con sello hidráulico en el plato de alimentación de la misma. Por la paila de la columna se da lugar a la entrada de

alimentación de vapor de baja presión. En la evacuación de la vinaza se utiliza otra sifa para sellaje. La columna destiladora se encuentra por encima del nivel cero (+4 m), a fin de hacer circular las vinazas sin necesidad de uso de bomba, a través del primer cuerpo del recuperador de calor. El mismo, posee dos cuerpos a fin de conducir siempre los fluidos sucios por los fluses. Para ello utiliza agua suavizada o condensada, como fluido de transferencia de calor.

Inobjetablemente existe un pequeño depósito que mediante la bomba permite la circulación adecuada del agua. En este depósito se realiza la reposición del agua caliente que se requiere mediante la acción de una válvula de nivel con flotador. Las flemas proveen la energía calorífica requerida por la rectificadora, al trabajar ésta a menor presión, pasando a través del separador que evita el arrastre de espumas o restos de vino que contaminen la columna. Para proveer el reflujo necesario para su trabajo, se dispone del calentavinos y de un condensador principal. Se complementa con un condensador auxiliar o de cabezas, por donde se extrae la flema por medio de la botella de desgasificación. Por el tope de la columna se conducen las flemas hacia la rectificadora, donde se concentra el alcohol y se purifica.

Cuando la separación se conduce con el fin de obtener uno de los componentes de la mezcla en un estado de pureza más alta, la operación recibe el nombre de rectificación. En esta la flema alcohólica, así separada en una primera destilación precisa de otra destilación en columnas adecuadas para obtener, por una parte, alcohol a una concentración y con un grado de pureza lo más elevado posible, y por la otra, el agua y las impurezas que lo acompañan; este segundo tratamiento constituye la operación conocida por primera rectificación.

Con el objetivo de lograr una calidad del producto final superior se efectúa una segunda rectificación en otra columna. Esto se puede lograr mediante el método de destilación discontinua. La columna rectificadora I trabaja bajo el mismo principio de funcionamiento que la destiladora, un líquido que desciende a contracorriente con vapores, ocurriendo en cada plato una condensación y una vaporización, con el consecuente enriquecimiento de los vapores alcohólicos.

La rectificadora se alimenta por un plato inferior, mientras que en la destiladora por un plato superior. La rectificadora tiene como función obtener un mayor grado y

pureza en el alcohol, contenido en las flemas procedentes de la destiladora. La misma está diseñada con cazoletas que son de importancia capital para el buen rendimiento de la columna. Con ellas se consigue poner en íntimo contacto los vapores alcohólicos con el líquido alcohólico reflujo y hacer que los nuevos vapores que este líquido emite sean de una mayor concentración.

La línea de reflujo colecta los condensados provenientes de condensador primario y condensador principal, así como los excedentes del separador líquido-gas mediante sellos hidráulicos y se retorna al plato de reflujo de la rectificadora mediante una sifa. Las colas se extraen por bombeos o propia presión hacia el lavador-decantador de *fusel-oil* o florentino, o hacia un depósito de colas, previo a un ligero enfriamiento en el enfriador de colas.

El alcohol obtenido se extrae de la zona de pasteurización de la columna rectificadora y es conducido directamente hacia los enfriadores, y de ahí hacia los depósitos de producción de clase B. Para lograr una producción de clase A de alta pureza es enviado a una segunda etapa de rectificación en la columna de alcoholes finos como se explica en el epígrafe 1.5.3.

En la figura 4 se observa el esquema del proceso destilación y rectificación general de alcohol técnico en la empresa Destilería “8 de Marzo”, EU. Urbano Noris de Holguín.

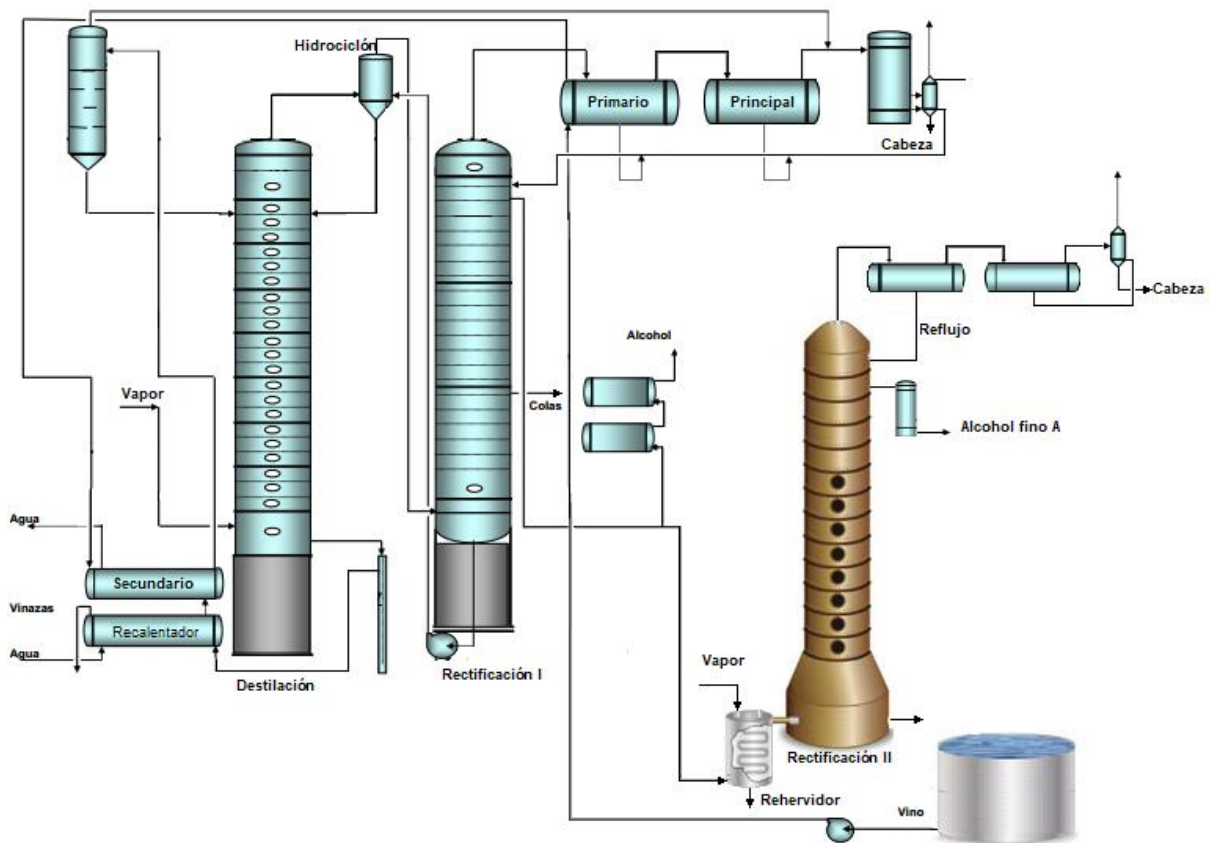


Figura 4. Esquema básico de Destilación Alcohol Técnico.

1.4.2 Componentes principales del sistema de destilación

Las columnas de destilación constan de varios componentes, cada uno es usado ya sea para transferir energía calorífica o transferir materia. Una típica columna de destilación contiene los siguientes componentes:

- Un armazón vertical donde tiene lugar la separación de los componentes de la mezcla.
- Componentes internos de la columna tales como platos.
- Un hervidor que provee la vaporización necesaria para el proceso de destilación.
- Un condensador que se usa para enfriar y condensar el vapor saliente de la parte superior de la columna.
- Un sistema de reflujo que maneje el vapor condensado que viene de la parte superior de la columna de manera que el líquido (reflujo) pueda ser recirculado a la columna [18].

El armazón vertical aleja los dispositivos internos y junto con el condensador y el hervidor, constituyen la columna de destilación. En la figura 5 se observa un esquema de una unidad de destilación rectificadora II típica [18].

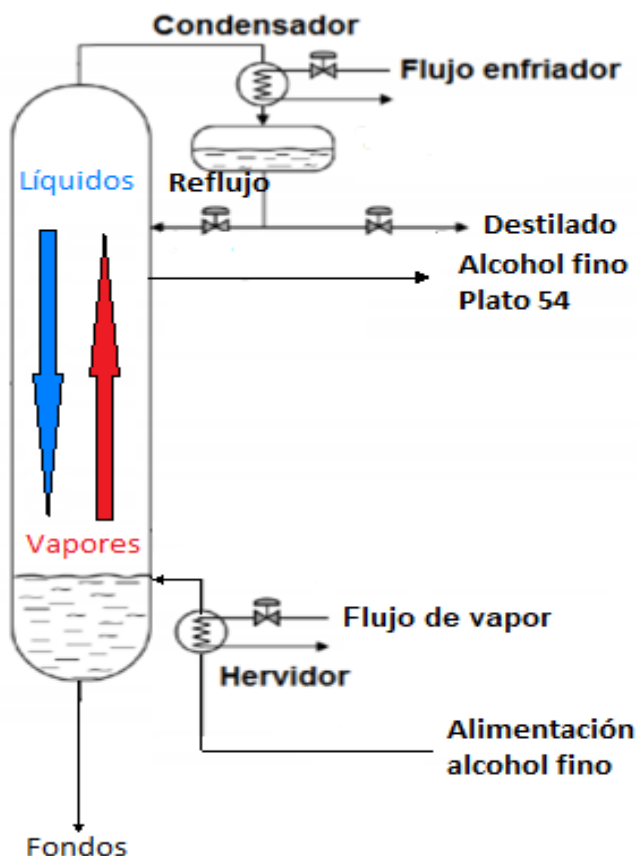


Figura 5. Etapa de rectificación II.

1.4.3 Alimentación de la segunda torre de Rectificación

El alcohol procedente de la primera etapa de rectificación alimenta al hervidor obteniéndose vapores de alcoholes que entran a la columna con temperatura por encima de 90 °C. Recíprocamente, toda la alimentación es transformada en vapor, se introduce por debajo de la primera bandeja o paila de alimentación. La mezcla líquido-vapor, en principio tiene que separarse fuera de la columna. La parte líquida en el intercambiador se introduce por arriba del hervidor y la parte de vapor por debajo. En la segunda etapa de rectificación el hervidor está ubicado en la parte inferior de la columna por las características de la alimentación a la torre y condiciones de trabajo.

1.5 Propósitos de la automatización

La automatización se puede definir como un sistema de fabricación diseñado con el fin de usar la capacidad de las máquinas para llevar a cabo determinadas tareas anteriormente efectuadas por seres humanos, y para controlar la secuencia de las operaciones sin intervención humana. El término automatización también se ha utilizado para describir sistemas no destinados a la fabricación en los que dispositivos programables o automáticos pueden funcionar de forma independiente o semi-independiente del control humano [20].

En cualquier automatización se persigue delegar en las máquinas la realización del trabajo de tal forma que éste sea llevado a cabo con la mínima intervención humana. La automatización solo es viable si el evaluar los beneficios económicos y sociales de las mejores que se podrían obtener al automatizar, son mayores a los costos de operaciones y mantenimiento del sistema.

La automatización de un sistema productivo frente al control manual del mismo, brinda ciertas ventajas y beneficios de orden económico, social y tecnológico, pudiéndose resaltar los siguientes: [20]

- Se asegura mejora en la calidad del trabajo del operador y en el desarrollo del procedimiento, dependiendo de la eficiencia del sistema implementado.
- Se obtiene una reducción de costos, puesto que se racionaliza el trabajo, se reduce el tiempo y dinero dedicado al mantenimiento.
- Se obtiene un conocimiento más detallado del proceso, mediante la recopilación de información y datos estadísticos del proceso.
- Factibilidad técnica en procesos y en operaciones de equipos.
- Factibilidad para la implementación de funciones de análisis, optimización auto-diagnóstico.
- Aumento en el rendimiento de los equipos y facilidad para incorporar nuevos equipos y sistema de información.
- Disminución de la contaminación y daño ambiental.

Un proceso manual requiere de un operador durante todo el tiempo en que se encuentre en funcionamiento y su estabilidad depende de la habilidad y velocidad del operador. Un proceso automático, únicamente requiere la intervención de un

operador durante la puesta en marcha y al final, para detener el proceso y recopilar información. Su estabilidad depende de la velocidad y precisión de la computadora y los dispositivos electrónicos.

1.5.1 Control retroalimentado

Los sistemas de control retroalimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador con la señal del error que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema [21].

1.5.2 Criterios para la selección de un PLC

Para seleccionar un PLC es necesario considerar ciertos requerimientos que se debe cumplir desde el punto de vista de software y hardware.

- Estándar de instrumentación y control implementado en la empresa; así como la experiencia adquirida durante los años de operación en la misma con los sistemas de control.
- Número de entradas y salidas (E/S) que dependerá de la cantidad de sensores y actuadores del proyecto. Es recomendable dimensionar con un margen de seguridad ya que luego en la puesta en marcha es común que se añadan algunas E/S.
- Tipo de E/S. Estas podrán ser analógicas o digitales.
- Capacidad de memoria. Es importante definir al momento de realizar el programa, debido a que según el número de instrucciones o extensión del programa será la capacidad de memoria a utilizar.
- Programa fácil de editar. La visualización del programa debe ser editada en una pantalla en forma simple, y en cualquier lenguaje de programación.
- Poseer una memoria no volátil y de respaldo. Esta memoria de respaldo es importante ya que permite almacenar el programa necesario.

- Protocolos. Esto se refiere a los diferentes tipos de protocolos necesarios para la comunicación con los dispositivos a interactuar.

1.5.3 Controlador lógico programable (PLC)

Un controlador lógico es una computadora industrial diseñada específicamente para recibir señales de operación de dispositivos de campo y por medio de un programa almacenado, generar señales de salida para controlar máquinas o procesos.

Esta computadora cuenta con características especiales en cuanto al diseño de su unidad central de procesamiento (CPU) y de sus módulos de entrada y salida (módulos I/O). Los PLC's son utilizados para el control de procesos automáticos de producción. PLC (*Programmable Logic Controller*), significa controlador lógico programable. Su nombre mismo lo define: es un dispositivo utilizado para controlar y esto se realiza en base a una lógica determinada. Esta lógica se define a través de un programa, esta característica es la que lo diferencia del resto de los dispositivos, que son capaces de controlar a través de la ejecución de una lógica [20].

Dentro de las funciones que realizan los PLC's se pueden destacar las redes de comunicación las cuales permiten establecer comunicación con otras partes del sistema de control. Las redes industriales permiten la comunicación y el intercambio de datos entre autómatas en tiempo real. En unos cuantos milisegundos pueden enviarse mensajes e intercambiar tablas de memoria compartida. Presenta además un sistema de supervisión, los autómatas permiten comunicarse con ordenadores provistos de programas de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza por una red industrial o por medio de una simple conexión por el puerto serie del ordenador. Además de dedicarse al control de sistemas de eventos discretos los autómatas llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos. Disponen de módulos de entradas y salidas analógicas y la posibilidad de ejecutar reguladores PID (Proporcional Integral Derivativo) que están programados en el autómata.

1.6 Estado del arte de la modelación matemática

Pérez en 2014 [3], desarrolló experimentos sobre la base de la identificación experimental en el proceso de precalentamiento de licor. Se validaron los modelos

matemáticos obtenidos y se propusieron los parámetros del controlador para optimizar el control del nivel de licor en el tanque de precalentamiento.

En el trabajo realizado por Leyes y otros en 2007 [4], se propone el control de nivel de un tanque orientado a la medición de una variable física, selección de un controlador, ajuste de sus parámetros, y uso de un actuador. Se comprobó la coherencia entre los resultados obtenidos en la simulación de la planta con el modelo identificado, y los resultados obtenidos en la implementación de la planta real. Además se determinó un controlador PI (Proporcional Integral) que se ajusta a los requerimientos de funcionamiento de la planta en el punto de operación de diseño.

Por su parte, Ormeño y otros en 2011 [5], implementaron un mini sistema de refrigeración industrial y una vez armado, realizaron pruebas experimentales con varias señales de entrada, luego con las señales de salida identificaron el proceso. Inicialmente emplearon modelos no paramétricos como el análisis de correlación y posteriormente se procedió con métodos paramétricos ARMAX, ARIMA, Output Error. Para la validación de los mismos, se verificó cuál de ellos cumplía mejor con la especificación de un modelo válido y en base al modelo seleccionado, se procedió a construir un controlador para el sistema utilizando la herramienta siso tool del matlab. Larco y otros en 2009 [6], identificaron una estructura de un modelo paramétrico a través del ident de Matlab, que se adaptaba a un cuarto térmico. Con el propósito de regular la temperatura del mismo, realizaron simulaciones para una entrada escalón unitario y apreciaron que el sistema en lazo cerrado sin controlador, exhibía error en estado estacionario apreciable; por lo que propusieron un controlador PI para reducir dicho error.

Estos trabajos conceptualizan con mucha claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador el empleo de los mismos para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia posee actualidad y vigencia.

1.6.1 Modelos paramétricos empleados en sistemas industriales

En la zona de rectificación II, inicialmente se desarrolló un experimento con señal escalonada para obtener un modelo matemático que describe la dinámica de la

temperatura en el Plato-54. Estos resultados se usaron en el diseño de un experimento más informativo, donde la presión vapor de agua siguió una señal binaria y el modelo de media móvil autorregresiva con entradas exógenas (ARMAX) presentó el mínimo error de predicción en comparación con los otros modelos paramétricos (ARX “Autorregresivo con entradas exógenas”, OE “Error de Salida”, y BJ “Box-Jenkins”)[7].

J. Salcedo y otros, desarrollaron un diseño de un controlador de retroalimentación de estado robusto para el control efectivo de la temperatura en la zona de calentamiento del horno de recalentamiento de planchones de acero, basado en los datos de campo disponibles y los procedimientos de identificación del sistema, se deriva un modelo matemático de la zona de calentamiento, que presenta un modelo ARMAX de cuarto orden [8].

T. Devashena, K. Dhanalakshmi en 2022, emplean una configuración experimental con la técnica de medición simultánea para caracterizar el comportamiento electrotermo y termo-mecano-electro de resortes helicoidales submilimétricos y milimétricos con diferentes composiciones de materiales. Se infiere que el sistema es de tercer orden, y se obtiene un ajuste de 94,18 % con el modelo ARX; más adecuado para implementar un lazo de control cerrado para un mayor análisis del sistema [9].

Stavropoulos P y otros, en 2021, realizaron el diseño e implementación de un gemelo digital (planta virtual dotada de una arquitectura) que ofrece una gestión de la incertidumbre y el control robusto de procesos, se calcularon los resultados de cinco identificaciones de sistemas paramétricos diferentes para la representación del sistema; y luego del proceso de prueba y error, se propuso el modelo ARX. Un sistema de tercer orden fue seleccionado en base al Criterio de Información Bayesiano (BIC) y el Criterio de la Suma de Cuadrados Residual Normalizada por la Suma de Cuadrados en Serie (RSS/SSS) [10].

1.7 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas

Un gran número de los métodos de diseño de sistemas de control se basan en el conocimiento del modelo del sistema a controlar. Aunque los modelos obtenidos

representan tan sólo una aproximación del sistema real, resultan suficientes para tomar las decisiones necesarias en el control.

Teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen con el modelo, se han adoptado principalmente dos enfoques diferentes: identificación analítica e identificación experimental:

1. Identificación analítica: consiste en desarrollar un modelo a partir del conocimiento de las relaciones físico-químicas que describen el comportamiento del proceso a identificar, planteando ecuaciones de balance de masa, energía, u otras. Es importante considerar la complejidad que este método presenta a la hora de considerar todas las leyes físicas que intervienen en un proceso. Esta técnica de identificación obvia las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, entre otras, que hacen que el comportamiento real nunca sea el previsto [22].
2. Identificación experimental: en la cual se considera el sistema como una caja negra con determinadas entradas y salidas. En este caso se realiza un conjunto de experimentos que proporcionan pares de medidas de las entradas y salidas, a partir de los cuales se trata de determinar el modelo del sistema [22].

En la práctica, resulta conveniente combinar ambos enfoques para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a este de mayor exactitud, pero el proceso de identificación se ve más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso [23].

En el campo del control, la identificación de sistemas ha sido una de las ramas más activas en los últimos años. Para diseñar sistemas de control es necesario obtener un modelo matemático del proceso a controlar, lo que supone en la mayoría de los casos la obtención de la estructura y parámetros del modelo matemático, generalmente dinámico, que reproduce con suficiente exactitud el comportamiento del sistema para los fines deseados [24].

La Identificación de sistemas, fue acuñada por Lotfi Zadeh en 1962, como: "Identificación es la determinación de un modelo, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, a la cual el sistema probado es equivalente" [25].

Dentro de la identificación, una de las ramas más activas durante los últimos años, ha sido la utilización de modelos paramétricos. De la misma forma, la obtención de modelos directamente en el espacio de estado, ha tenido un considerable desarrollo teórico.

A pesar del desarrollo de esta disciplina y la necesidad existente en la industria de métodos de identificación eficientes, los resultados obtenidos en la misma durante las últimas décadas no son usados por los ingenieros de control industrial. Se considera que una de las causas de este hecho radica en que muchos investigadores se han enfocado en la estimación de parámetros y análisis de convergencia, lo cual constituye solamente una pequeña parte del procedimiento de identificación, mientras que unos pocos estudian el diseño de experimentos y la validación de modelos, que constituyen las temáticas más próximas a las aplicaciones del modelo. Otra causa se debe al estilo de muchos *softwares* de identificación, ya que aunque resultan muy flexibles y sencillos para los investigadores y estudiantes, no ocurre lo mismo para los ingenieros de control en las industrias, quienes no tienen entrenamiento académico en identificación de sistemas [26].

La identificación de sistemas se ha extendido en la actualidad al análisis de dinámicas más complejas, a través de la utilización de técnicas novedosas. Dentro de las técnicas más investigadas recientemente se encuentran las basadas en los sistemas biológicos y la inteligencia humana, que agrupan las redes neuronales artificiales, la lógica difusa y los algoritmos evolutivos [27].

1.7.1 Proceso de identificación

En términos generales, el proceso de identificación experimental comprende los siguientes pasos:[28]

1. Obtención de datos de entrada-salida: para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la

identificación del modelo. Se trata, por tanto, de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

3. Elección de la estructura del modelo: si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
4. Obtención de los parámetros del modelo: se procede a la estimación de los parámetros de la estructura, que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. Validación del modelo: consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
 - a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
 - c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el paso correspondiente. En la figura 6 se describe la metodología a emplear para la realización de la identificación y obtención de un modelo válido de cualquier sistema por la vía experimental [29], la cual fue descrita anteriormente.

1.7.2 Métodos de identificación

En la actualidad, el desarrollo de las ciencias computacionales ha permitido crear herramientas de *software* para la identificación de sistemas, entre la que se encuentra el MATLAB. Con este es posible procesar modelos paramétricos como ARX (*Auto Regressive Xogen*), ARMAX (*Auto Regressive Moving Averagee Xogen*), Modelo OE (*Output Error*), Análisis de Correlación, Estimación Directa de Respuesta a Impulso; entre otros.

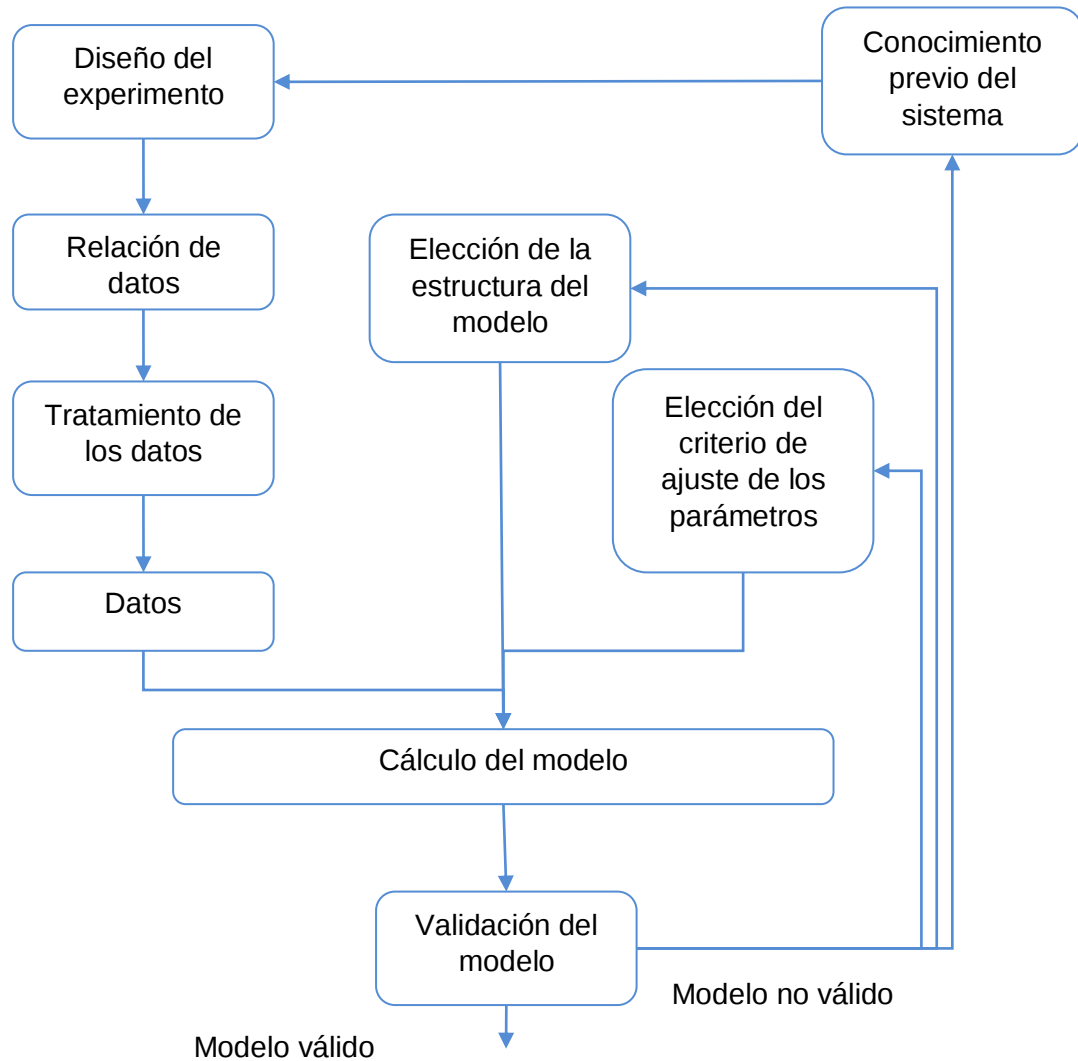


Figura 6. Esquema del proceso de identificación experimental.

Un modelo lineal general de un sistema puede ser descrito simbólicamente, como se muestra en la figura 7.

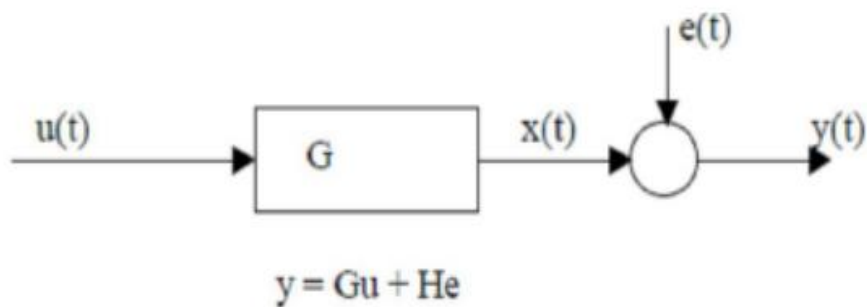


Figura 7. Esquema del modelo lineal.

Donde la salida medida (y) es debida a la entrada medida (u) y al ruido (e), G denota las propiedades dinámicas del sistema, es decir, como la salida se forma desde la entrada. Para sistemas lineales se llama función de transferencia entre la entrada y la salida. H refiere las propiedades del ruido y se le llama modelo del ruido, y describe cómo está formada la perturbación en la salida [22].

La estructura de un modelo lineal se representa de la siguiente manera:

$$A(q)y(t) \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t) \pm \left[\frac{C(q)}{D(q)} \right] e(t) \quad (I)$$

Donde A, B, C, D, y F son polinomios en el operador de retraso q^{-1}

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (II)$$

$$B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (III)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad (IV)$$

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (V)$$

$$F(q) = 1 + f_1 q + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (VI)$$

Los términos na, nb, nc, nd y nf dan cuenta de los órdenes de los polinomios y (a, b, c, d y f) constituyen los coeficientes de la función de transferencia discreta y que se obtienen según: Mínimos cuadrados y Variable instrumental.

Los modelos con estructuras AR, ARX, ARMAX, OE y BJ son casos particulares de la estructura general y se obtienen según corresponde.

La estructura AR corresponde con nb=nf=nc=nd=0 y además u(t)=0.

La estructura ARX corresponde con nf=nc=nd=0.

La estructura ARMAX corresponde con nf=nd=0.

La estructura OE corresponde con na=nc=nd=0.

La estructura Box-Jenkins (BJ) corresponde a na=0.

1.7.3 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB

El *software* profesional MATLAB [30] posee un *Toolbox* para la identificación de sistemas, el cual constituye una poderosa herramienta para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, a partir de un conjunto de datos de entrada-salida.

La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica (*Ident*), la cual facilita construir los modelos. Otra forma

es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión “m”, utilizando los comandos de este *toolbox*. Esta herramienta posee la ventaja de proveer varios métodos y estructuras para obtener un modelo que se aproxime al sistema real. Además, permite analizar y validar los modelos utilizando respuestas frecuenciales y temporales, así como el análisis de los residuos.

Conclusiones

- En este capítulo se realizó una caracterización de los elementos principales del proceso de rectificación II en el C.A.I Urbano Noris Cruz, del municipio San Germán.
- También se ofreció una panorámica de la identificación de sistemas, describiéndose en breve síntesis las técnicas y métodos más empleados.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE RECTIFICACIÓN II

En el presente capítulo se describen los experimentos que se realizaron manipulando la presión de vapor a la entrada del rehervidor instalados en la entrada de la torre rectificadora II, para mantener una temperatura adecuada en el plato 54. Se analizan los resultados obtenidos luego del procesamiento de los mismos, con los cuales se lograron obtener los modelos previstos y los mejores ajustes para el controlador en lazo cerrado. Finalmente se realiza una valoración económica medioambiental con el empleo de los parámetros del controlador propuesto, para el funcionamiento eficiente del proceso.

2.1 Modelación y propuesta de control

En el presente capítulo se describen los experimentos realizados, manipulando el flujo de vapor por medio de la presión en el calentador instalado en la segunda rectificadora, para mantener una temperatura de 78,8 °C en la salida del plato 54 en la torre de rectificación de alcohol fino. Se analizan los resultados obtenidos luego del procesamiento de los mismos, con los cuales se logra obtener los modelos previstos y los mejores ajustes para el controlador en lazo cerrado. Finalmente se realiza una valoración económica medioambiental con el empleo de los parámetros del controlador propuesto, para el funcionamiento eficiente del proceso.

Se presenta una propuesta de instrumentación para el control estudiado y respectiva automatización.

2.1.1 Rangos de operaciones del proceso de la segunda etapa rectificación

Los valores de los rangos de operación de la Rectificadora II se muestran en tabla 1.

Tabla 1. Rango de operación

Parámetros	Rangos	Unidad
Flujo de alcohol fino alimentado	1 – 1,5	m ³ /h
Temperatura de alcohol fino alimentado	79	°C
Temperatura del reflujo de alcohol	75	°C
Flujo del reflujo de alcohol	1,2-1,5	m ³ /h
Flujo de vapor al calentador dealimentación de la torre	0,4	t/h
Presión de vapor	0,5-0,6	kgf/cm ²
Temperatura de vapor	110-120	°C
Flujo de alcohol fino producido	0,8-1,2	m ³ /h

A continuación se ofrecen algunos detalles del proceso investigado, que son importantes para su modelado, tal es el caso de las variables que influyen.

La propuesta de control a ser planteada se presenta de la siguiente forma:

Existe una variable de entrada y una de salida. La variable manipulada considerada también entrada, es la perturbación del flujo de vapor a baja presión (P_{vapor}). La variable a controlar es la temperatura en el plato 54 de la torre rectificadora II (T_{p-54}).

Al considerar que las variables de interés para la identificación han de ser aquellas útiles para el control, y que el objetivo de este es mantener T_{p-54} en la descarga del plato en el rango establecido ($78,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), el sistema, considerado como una caja negra (figura 8), contiene las siguientes variables:

Variables de entrada:

- F_{AF} (Flujo de alcohol fino alimentado), [m^3/h].
- T_{AF} (Temperatura de alcohol fino alimentado), [$^{\circ}\text{C}$].
- F_R (Flujo del reflujo de alcohol), [m^3/h].
- T_{AR} (Temperatura del reflujo de alcohol), [$^{\circ}\text{C}$].

Variables de salida:

- T_{p-54} (Temperatura del alcohol plato 54), [$^{\circ}\text{C}$].

Las principales perturbaciones que afectan a este proceso son:

- F_{vapor} (flujo de vapor al calentador de alimentación de la torre), [t/h].
- P_{vapor} (Presión de vapor), [kgf/cm^2].
- T_{vapor} (Temperatura de vapor), [$^{\circ}\text{C}$].

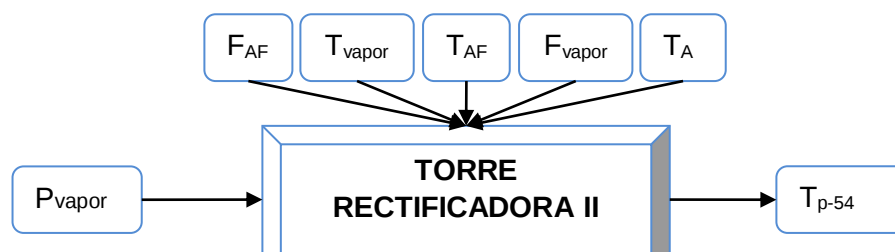


Figura 8. Variables consideradas en el proceso

2.2 Requisitos previos a la experimentación

Como se comentó en el capítulo 1, la identificación experimental es un método de construcción de modelos basado en experimentos. La primera de las etapas de un proceso de identificación es el diseño del experimento que incluye la selección y determinación de factores como: diseño de la señal de entrada, selección del período de muestreo, identificación *on-line* u *off-line*, equipos disponibles para la generación de la señal de entrada, almacenamiento de datos y cálculos, filtro de las señales; teniendo siempre en cuenta las restricciones dadas por las condiciones de operación del proceso y las propiedades de los sensores y actuadores.

Los datos se tomaron a partir de los instrumentos del campo existente en la planta (ver anexo 2), durante el proceso productivo en los turnos de operación, para su posterior procesamiento. Para utilizar debidamente los métodos de identificación es necesario, siempre que sea posible, diseñar adecuadamente el experimento. Esto conlleva a que, para el diseño adecuado del experimento, sean necesarios ciertos conocimientos básicos sobre el comportamiento del proceso. Esta información puede obtenerse realizando una serie de experimentos básicos y sencillos conocidos con el nombre de experimentos preliminares.

Una manera muy útil consiste en analizar los datos correspondientes al funcionamiento normal del proceso (*free run experiments*), lo cual no requiere ninguna activación específica de la entrada. El experimento con entrada escalón (*stair case experiment*) es útil para observar el grado de linealidad del proceso estudiado y determinar las constantes de tiempo del sistema. Consiste en aplicar, a una de las entradas seleccionadas, una variación perceptible para el proceso. Esta información es vital en el diseño y selección de la señal a usar, así como sus parámetros de tiempo más importantes (período de conmutación, período de muestreo, rango de amplitud de entrada y orden de la señal). Para concretar los experimentos se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- No se afectó la operación de la planta durante la realización de los experimentos.

- Observar que tanto el vapor a baja presión en el rehervidor como la temperatura en el plato 54, mantuviera una operación estable previa a la realización del experimento.
- Ante determinadas perturbaciones externas o internas en el proceso, se desechaban las pruebas.
- El período de muestreo a utilizar es 180 s.

2.3 Identificación experimental del caso de estudio

Se realizaron varios experimentos aplicando de forma manual secuencias de escalones positivos y negativos, al flujo de vapor a baja presión de entrada, en aras de identificar el proceso.

Los modelos matemáticos que se obtuvieron son modelos paramétricos. Para procesar los datos se utilizó el "*Toolbox*" de Identificación del paquete profesional de programas MATLAB [30], el cual contiene herramientas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos entrada-salida observados (ver anexo 3, y5).

2.3.1 Experimento # 1

Durante el experimento se tomaron 637 datos correspondientes a las variables (P_{vapor}) y (T_{p-54}) con un período de muestreo de 3 min., tras aplicarle a esta última un escalón negativo, con una amplitud en forma gradual de 0,6 Kgf/cm² hasta 0,5 Kgf/cm². En este caso, se disminuyó la presión de vapor al rehervidor con una variación de 17 % de su valor normal. En la figura 9 se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

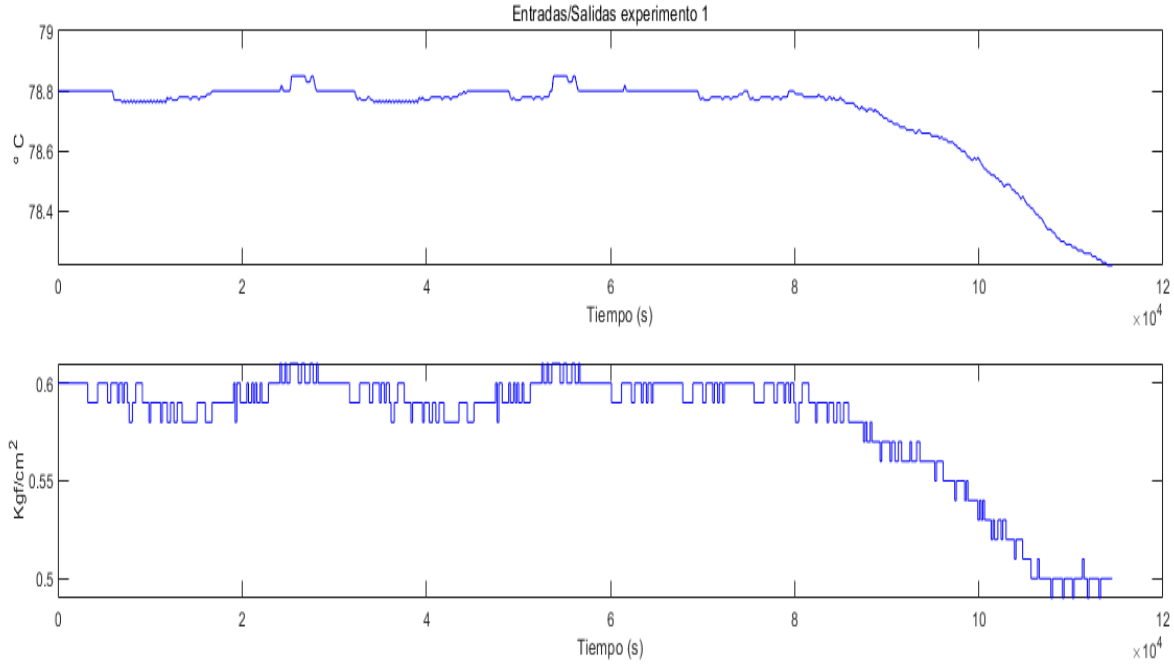


Figura 9. Comportamiento de temperatura y presión en el experimento 1.

Luego de recopilados los datos, se hizo una revisión minuciosa de los mismos y se realizó un pre-procesamiento, aprovechando las facilidades que brinda el *Toolbox* de Identificación del MATLAB, el cual consistió en suprimir los niveles constantes y hacer que la media de los datos fuera cero por medio del comando *dtrend*. Se probó el comando *Filter* pero no se apreciaron mejoras en el ajuste del modelo. Luego con la opción *select range* se seleccionó los datos para la estimación y otra para la validación.

Para T_{p-54} se obtuvo como mejor modelo amx2221 con un ajuste de 61,99 %, el cual es un modelo de orden 3.

$$\frac{T_{p-54}}{P_{vapor}} = \frac{0.000858s^2 + 4.856e - 06s + 2.609e - 07}{s^3 + 0.0008885s^2 + 0.0003049s + 6.288e - 08}$$

Con respecto a la validación de los modelos, se efectuaron análisis de residuos (errores de predicción), teniendo en cuenta que se realizaron ciertas suposiciones con respecto al ruido [31].

En la figura 10 se muestran los residuos para el modelo, donde se puede observar que la función de correlación se sitúa fuera de los niveles de confianza, mientras que

la de correlación cruzada entre los residuos y la entrada se encuentra dentro de los intervalos de confiabilidad.

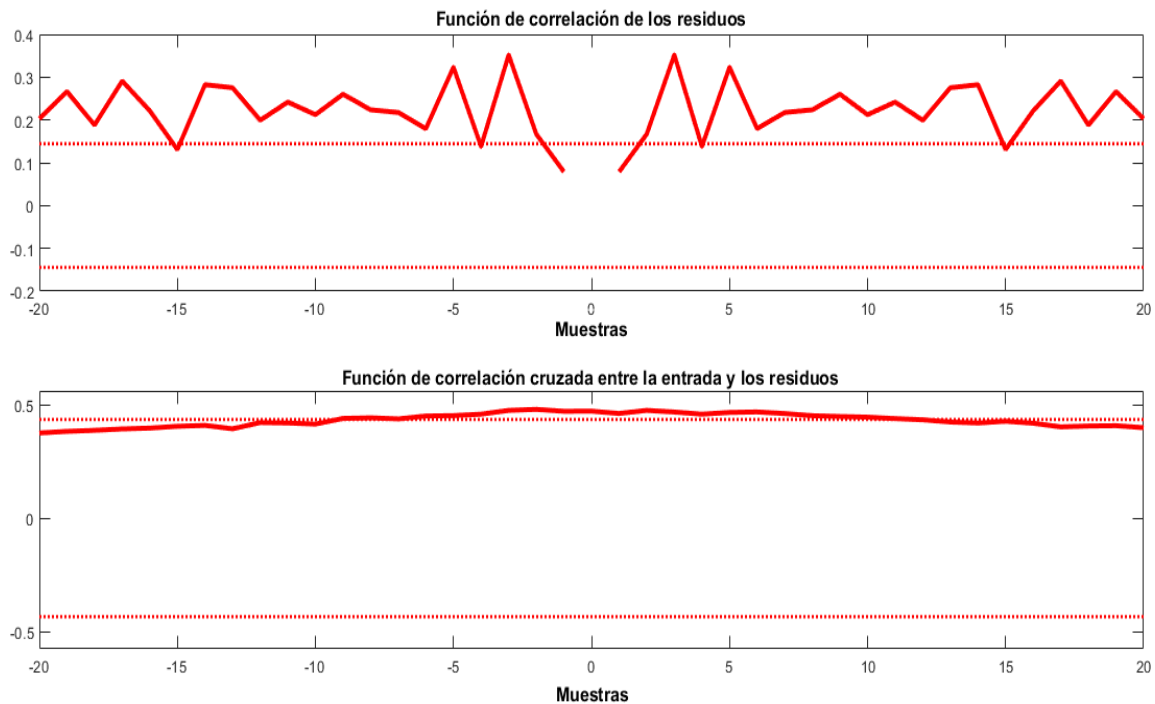


Figura 10. Prueba de residuos para el modelo estimado en el experimento 1.

En la figura 11 se observa la comparación de la salida medida con la salida del modelo, estimada para un horizonte de predicción infinito. Para ello, se tomó una parte de los datos originales que no fueron empleados para construir el modelo. El comportamiento del modelo obtenido se aproxima al del sistema real y exhibe cierto grado de imprecisión.

Tal como se observan en la figura 12, los dos polos están situados dentro del círculo unitario del plano complejo, por lo que el sistema es estable. Se detallan además otros parámetros a tener en cuenta en la configuración de los ceros y polos como son: amortiguamiento, sobrepaso y frecuencia.

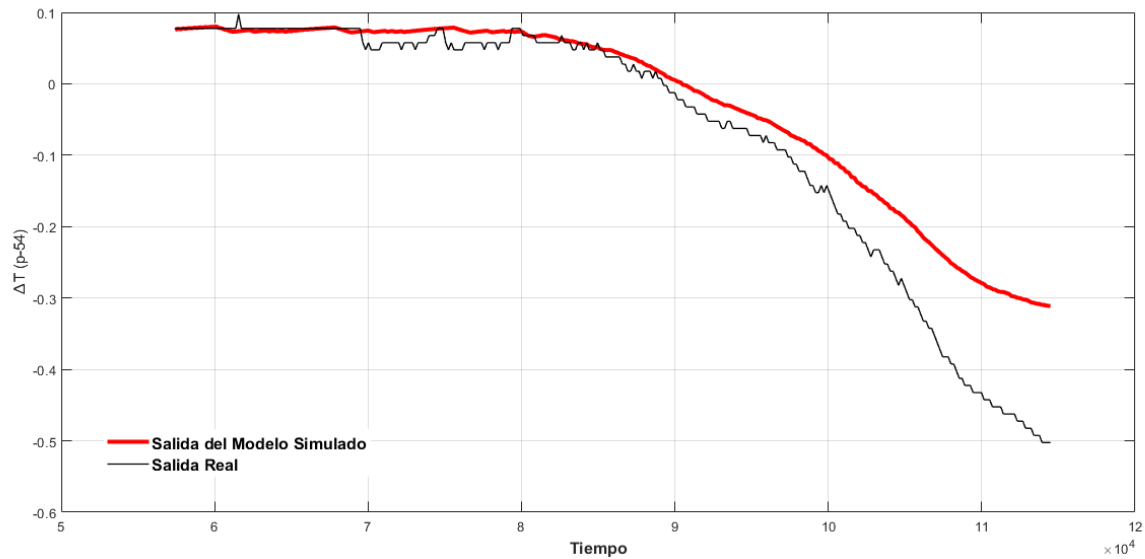


Figura 11. Salida real menos salida del modelo simulado en el experimento 1.

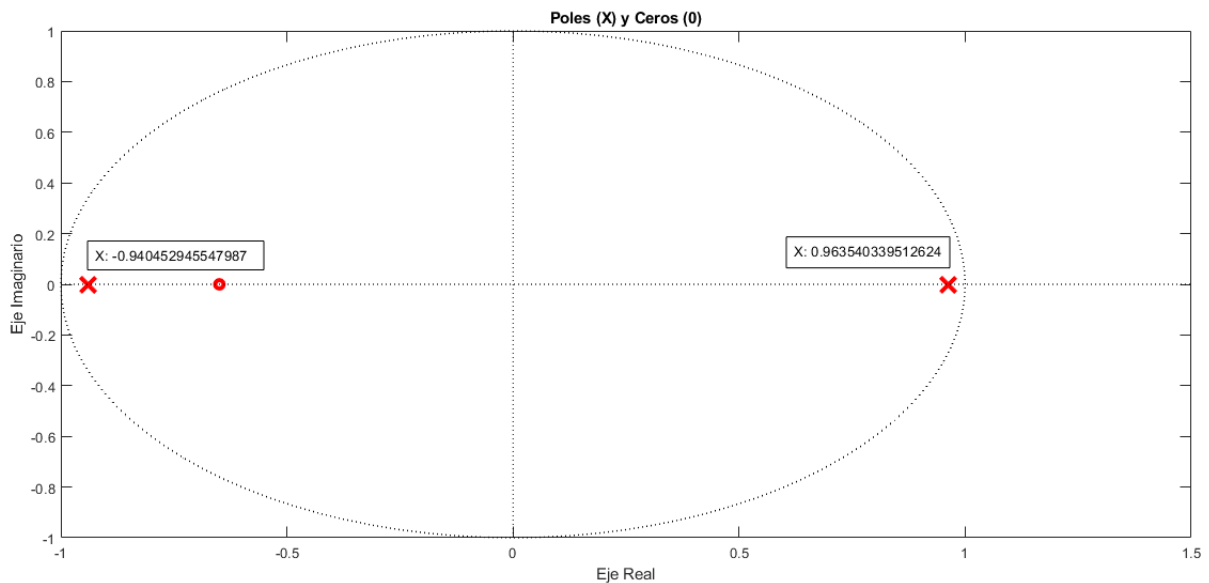


Figura 12. Mapa de polos y ceros del modelo simulado en el experimento 1.

2.3.2 Experimento # 2

En este experimento se registraron 625 datos correspondientes a las variables (Pvapor) y (Tp-54) con un período de muestreo de 180 s., tras aplicarle a esta última un escalón positivos con una amplitud de forma progresiva. En este caso, se aumentó la presión de vapor al rehervidor con una variación de 19,7 %. En la figura 13 se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

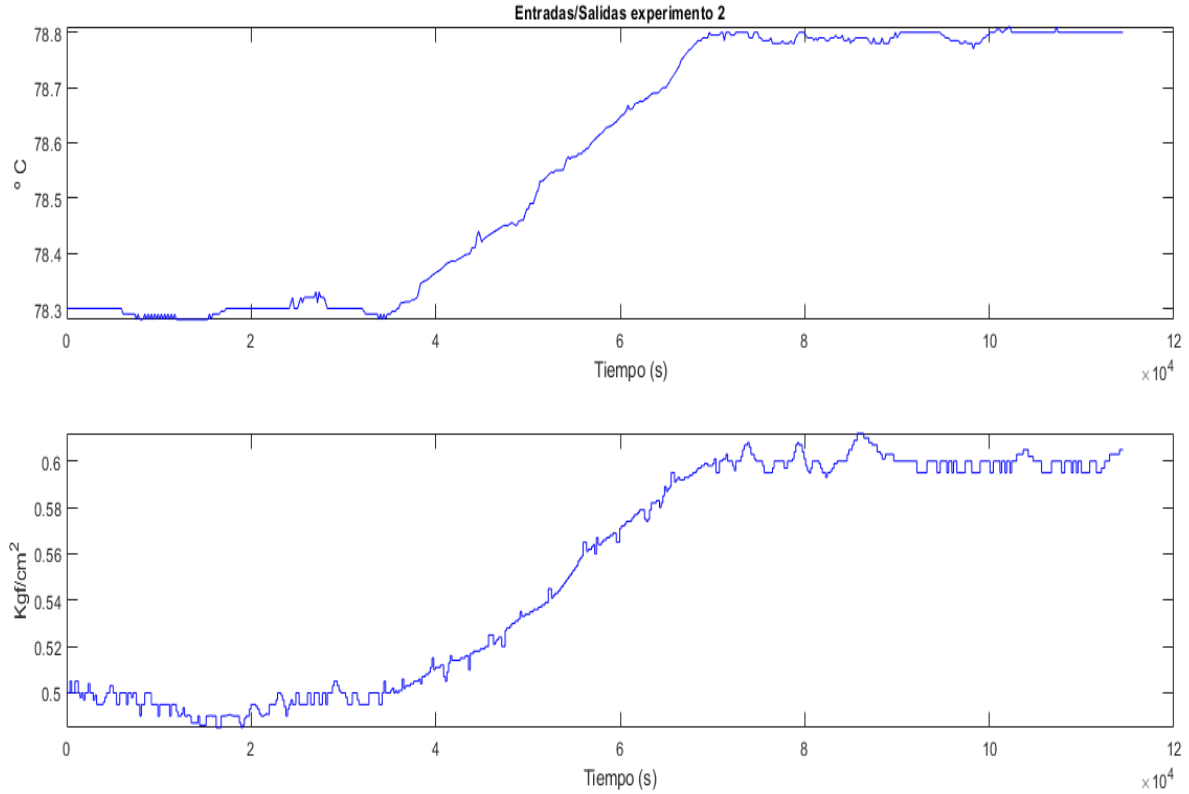


Figura 13. Comportamiento de temperatura y presión en el experimento 2.

Se obtuvo como mejor modelo amx2221 con un ajuste de 60,15 %.

A través del comando d2c se convirtió el modelo de discreto a continuo, resultando un modelo de segundo orden.

$$\frac{T_{p-54}}{P_{vapor}} = \frac{0.0005761s + 3.944e - 07}{s^2 + 0.0001304s + 8.527e - 08}$$

En la figura 14 se observa que, la función de correlación de los residuos se encuentra dentro de los niveles de confianza y la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada, refleja su independencia, pues ésta no sale de los intervalos de confiabilidad.

Para la validación de este modelo se realizó la comparación de la salida del modelo con la salida real, lo cual se muestra en la figura 15, donde se observa que la salida del modelo se aproxima bastante a la real.

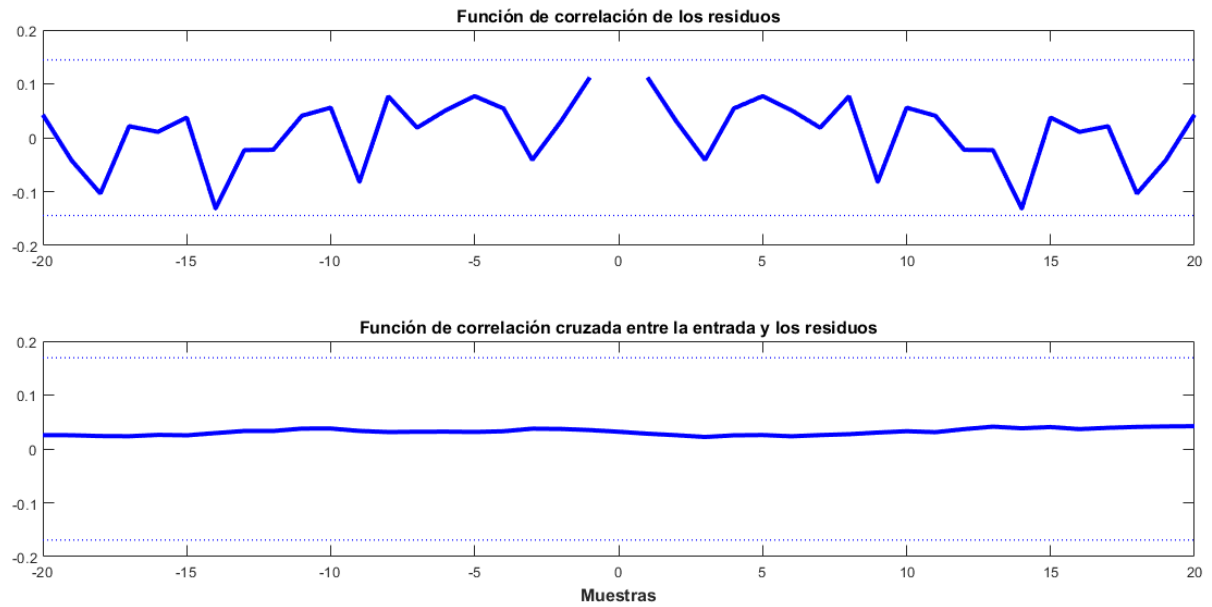


Figura 14. Prueba de residuos para el modelo estimado en el experimento 2

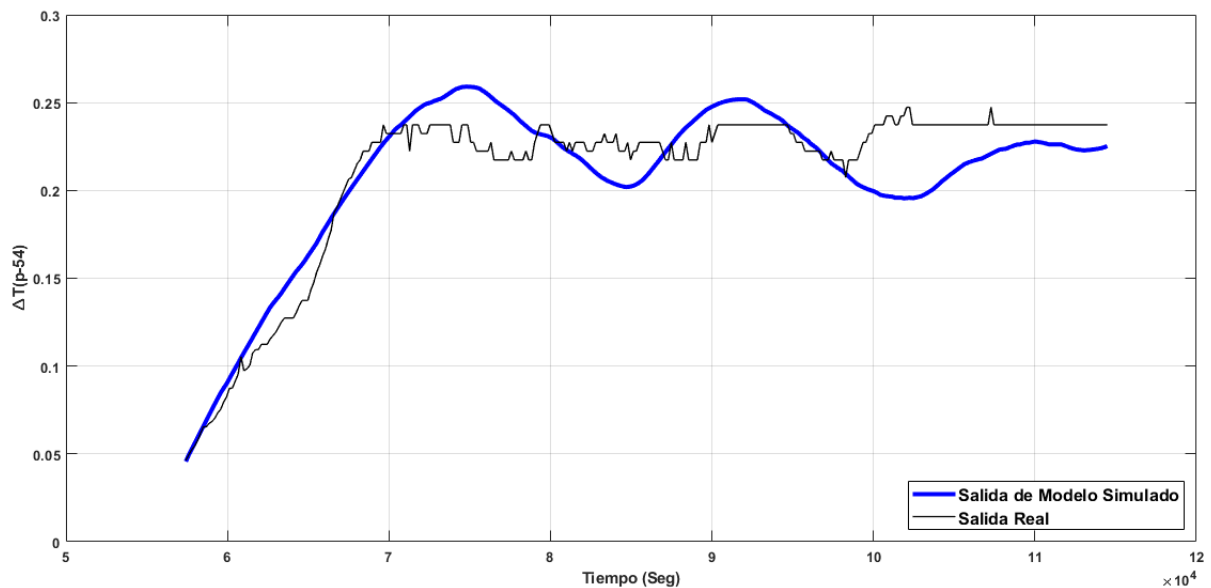


Figura 15. Salida real menos salida del modelo simulado en el experimento 2

En cuanto a la configuración de los ceros y polos de este modelo, se evidencia la estabilidad del mismo al estar ubicados los dos polos en el interior del círculo unitario del plano complejo (figura 16).

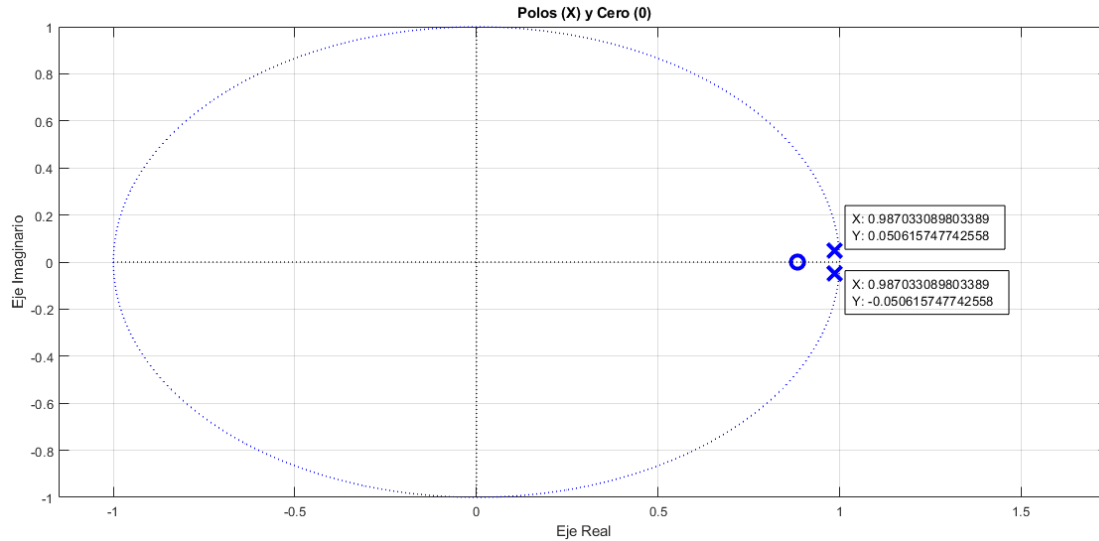


Figura 16. Mapa de polos y ceros del modelo simulado en el experimento 2

A partir de los resultados obtenidos en los experimentos realizados, los modelos polinómicos describieron diferentes comportamientos como se refleja en la tabla 2.(ver anexo 6)

Tabla 2. Ajustes de los modelos polinómicos

	Modelos Polinómicos			
	bj22221	arx441	amx2221	oe221
Experimento 1	12,84%	50,61%	61,99%	32,11%
Experimento 2	31,15%	-26,49%	60,15%	55,29%

2.4 Ajuste de controladores

Se ha determinado a través del análisis del diagrama de polos y ceros, residuos y por ciento de ajuste *bets Fit*; que el modelo amx2221 es el apropiado para utilizarlo en estrategias de control.

Para encontrar la mejor sintonía de los controladores en lazo cerrado, se utilizó la interfaz gráfica PID Tuner, invocada mediante el comando pidtool desde la ventana *Command Windows* del MATLAB.

Para la simulación (Figura 17), se tuvo en cuenta una comparación entre diferentes configuraciones de los controladores adaptados al lazo de control de temperatura en la torre de alcohol fino según se muestra en las tablas 3 y 4, que permiten seleccionar la configuración más adecuada.(ver anexo 7 y 8)

Tabla 3. Parámetros de constantes de tiempo para el sistema experimento 1

Exp.1 Lazo de control	Tiempo de asentamiento t_s (↓)	Tiempo de sobrepaso t_p (↓)	M_p (↓)	Estabilidad
P	210 s	1,02	2,44 %	estable
PI	83,4 s	1,25	25,3 %	estable
PID	85,6 s	1,12	12,1 %	estable

Tabla 4. Parámetros de constantes de tiempo para el sistema experimento 2

Exp.2 Lazo de control	Tiempo de asentamiento t_s (↓)	Tiempo de sobrepaso t_p (↓)	M_p (↓)	Estabilidad
P	147 s	1,09	24,9 %	estable
PI	182 s	1,21	21,1 %	estable
PID	378 s	1,12	12,3 %	estable

Teniendo en cuentas los parámetros de los coeficientes de las constantes de tiempo se selecciona el mejor controlador con un tiempo de amortiguamiento de 85 s y un máximo sobrepaso del 12 %. A pesar de no ser el de menor tiempo de asentamiento si cumple con el sobrepaso menor de 25 %.

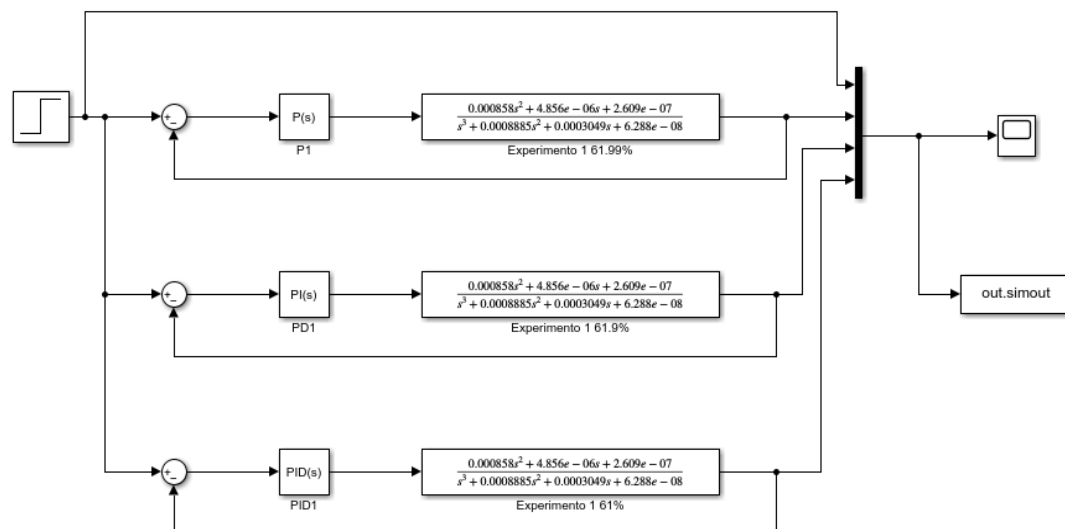


Figura 17. Simulación en el matlab simulink para diferentes configuraciones de control.

Como se aprecia en la figura 18, la curva azul que representa la respuesta de la planta en lazo cerrado para una entrada escalón unitario, exhibe un error de estado estacionario de 0,194, que difiere mucho de la entrada escalón unitario en magnitud

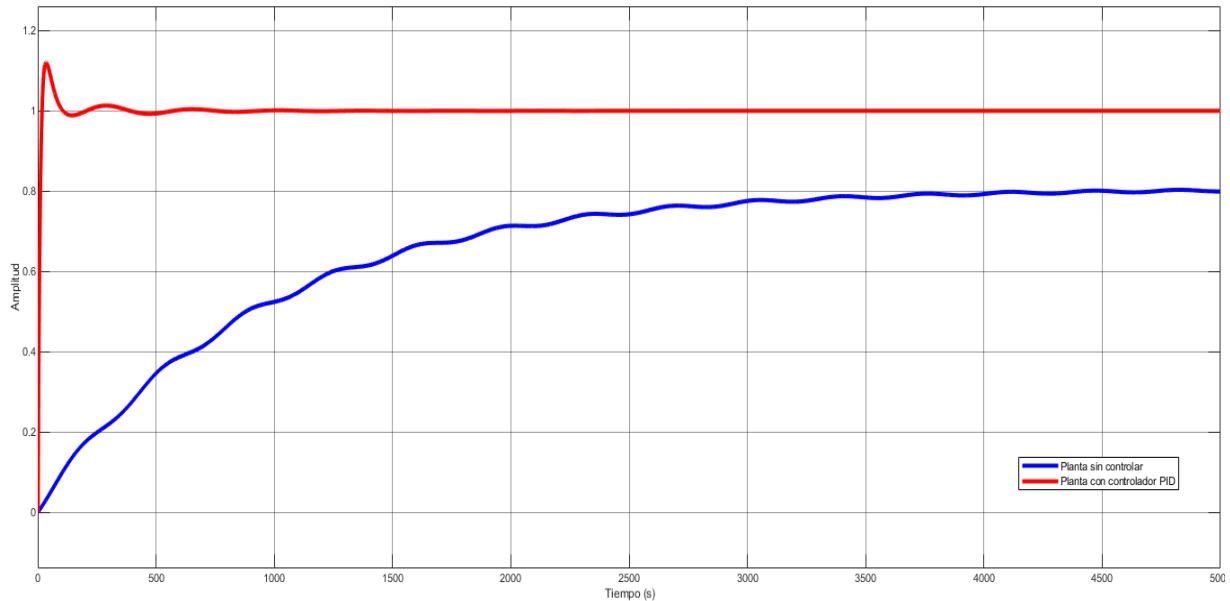


Figura 18. Gráfico del comportamiento del sistema controlado.

Analíticamente podemos corroborarlo mediante la expresión:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{1}{1+G(s)H(s)} * Fp(s) \quad (VII) \quad (19)$$

Sustituyendo $Fp(s)$ por un escalón unitario y $G(s)H(s)$ por el modelo bj22221 queda:

$$e_{ss} = s * \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.000858s^2 + 4.856e-06s + 2.609e-07}{s^3 + 0.0008885s^2 + 0.0003049s + 6.288e-08}} * \frac{1}{s} \quad (VIII)$$

Reduciendo y calculando

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + 4.149} \quad (IX)$$

$$e_{ss} = 0.194 \quad (X)$$

Se ha diseñado un controlador PID (proporcional-integral-derivativo), cuyos parámetros son: $K_c=154,7137$, $T_i=3,3938$, $T_d=94,8437$, debido a que el proceso es lento y amortiguado. Se comprueba que la respuesta al *step* en lazo cerrado con este controlador (curva roja) satisface los requerimientos, con un error a estado estacionario de 0,194, sobrepaso de 12,3 % y tiempo de asentamiento de 86 segundos.

2.5 Selección de instrumentos

Para llevar a cabo el control de la variable de salida, es necesario interconectar los elementos precisos para un control automático con los parámetros antes descritos, sin embargo, antes debe hacerse selección de cada uno de los instrumentos. Para el desarrollo del trabajo de tesis se eligieron los instrumentos más sencillos y cercanos a las estrategias de control [32].

2.5.1 Propuesta del instrumento de medición: Transmisor de presión

Como instrumento de medición y transmisión de presión en el proceso, se propone el uso de un manómetro transmisor de presión de la marca SIEMENS, modelo SITRANS P de las series DS, que se basa en el mecanismo de diafragma para sensar la variable de presión. En la tabla 5 se muestran las especificaciones del instrumento [33].

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los transmisores de presión.

Descripción del instrumento	2.5.2 Transmisores de presión SITRANS P, Serie DS III, 7MF4*33
Tipo de materiales y mecanismo	Sello de diafragma de acero inoxidable
Salida de señal eléctrica	4-20 mA
Materiales de superficie	Aluminio fundido
Alimentación	12 VCD

Transmisores de presión *SITRANS P*, Serie DS III, 7MF4*33

El transmisor *SITRANS P*, Serie DS III (figura 19), mide de acuerdo a las variantes: la presión, la presión diferencial, la presión absoluta o el nivel de llenado de gases, vapores y líquidos agresivos y no agresivos, como también peligrosos. Otras magnitudes de medición como volumen, masa, caudal volumétrico y caudal de masa pueden deducirse de la magnitud "presión" a través de especificaciones de parámetros. La señal de salida es una corriente continua, independiente de la carga, de 4 hasta 20 mA.



Figura 19. Transmisor de presión SITRANS P, Serie DS III, 7MF4*33

En la figura 20 se ilustra el cabezal de medición para presión relativa.

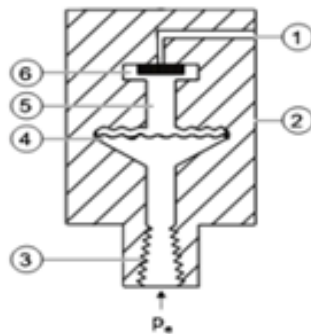


Figura 20. Cabezal de medición para presión relativa

- ① Orificio de presión de referencia
- ② Cabezal de medición
- ③ Conexión a proceso
- ④ Membrana separadora
- ⑤ Líquido de relleno
- ⑥ Sensor de presión relativa

P_e Presión de entrada

La presión de entrada P_e se transmite a través de la membrana separadora ④ y del líquido de relleno ⑤, hasta el sensor de presión relativa ⑥ y su membrana de medición; sufre una desviación. Esta desviación modifica el valor de resistencia de las cuatro piezorresistencias (conectadas en puente) del sensor de presión relativa. La modificación de la resistencia produce una tensión de salida de puente proporcional a la presión de entrada. Los transmisores, cuyos márgenes de medición

son ≤ 63 bar, miden la presión de entrada respecto a la atmósfera, mientras que los transmisores con márgenes de medición ≥ 160 bar, la miden respecto al vacío [34].

Presión diferencial y caudal:[33]

Esta ejecución se utiliza para medir:

- La presión diferencial, p.ej. la presión efectiva.
- De una pequeña sobrepresión positiva o negativa.
- El caudal $q \sim \sqrt{\Delta p}$ (junto con un aparato de estrangulación)

Nivel de llenado:[27]

Esta ejecución de aparato con brida de montaje mide el nivel de llenado de líquidos agresivos y no agresivos como también peligrosos, en depósitos abiertos y cerrados. Son posibles márgenes de medición entre 25 mbar y 5 bar. El diámetro nominal de la brida de montaje tiene un valor de 3 o 4 pulgadas. En la medición de nivel de llenado en depósitos abiertos permanece la conexión negativa del cabezal de medición abierta (medición “contra atmósfera”), en la medición en depósitos cerrados por lo general está conectada al depósito para la compensación de la presión estática.

Presión absoluta:[33]

Esta ejecución de aparato mide la presión absoluta de gases, vapores, y líquidos agresivos y no agresivos, como también peligrosos.

Existen dos series: una serie “Presión diferencial” y una serie “Presión”. La serie “Presión diferencial” se caracteriza por una mayor capacidad de sobrecarga. Son posibles márgenes de medición entre 8,3 mbar y 30 bar.

2.5.2 Propuesta del instrumento: Transmisor de temperatura

Sensor de temperatura con carcasa de aluminio ip54–pt100

Un Pt100 es un termómetro de inmersión por resistencia del tipo RTD (Dispositivo Termo Resistivo). Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir, dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el

terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal). Se utiliza para medir la temperatura de medios líquidos y gaseosos en un rango de temperatura de -50 - 400 °C. La carcasa de aluminio con clase de protección IP54 tiene una longitud de instalación de 100 mm. La varilla del sensor, con un diámetro de 6 mm, está hecha de acero inoxidable [35].

Características del sensor de temperatura:

- Pt100 de inmersión
- 3 hilos
- Rango de medida: -50 - 400 °C
- Resistencia a la presión: máx. 40 bar
- Longitud de montaje: 100 mm
- Diámetro de la sonda: 6 mm
- Material de la sonda: acero inoxidable
- Material de la carcasa: aluminio
- Carcasa de conexión: Forma J
- Entrada de cable: M16
- Conexión: Bornes con tornillo (máx. 1,5 mm²)



Figura 21. PT-100 tipo RTD

Ventajas del Pt100 [36]

- Son levemente más costosos y mecánicamente no tan rígidos como las termocuplas, las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °).

- Entregan precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, sino que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.
- Son colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión.

Conexión de la Pt100

Existen tres modos de conexión para las Pt100, cada uno de ellos requiere un instrumento lector distinto. El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica $R(t)$ del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables R_c .

Con 2 hilos

El modo más sencillo de conexión (pero menos recomendado) es con solo dos cables. En este caso las resistencias de los cables R_{c1} y R_{c2} que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable. El lector medirá el total $R(t) + R_{c1} + R_{c2}$ en vez de $R(t)$. Lo único que se puede hacer es usar cable lo más grueso posible para disminuir la resistencia de R_{c1} y R_{c2} y así disminuir el error en la lectura.

Con 3 hilos

El modo de conexión de 3 hilos (figura 22) es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

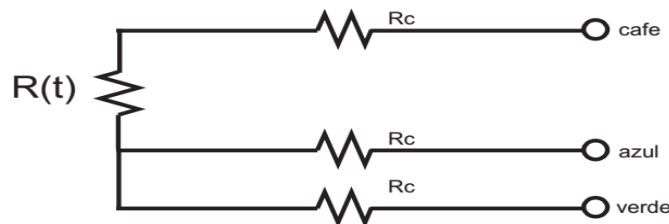


Figura 22. Conexión de la PT-100 de 3 hilos

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa (casi siempre) en el "puente de *Wheatstone*". Por supuesto, el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión. En el caso particular de los instrumentos ARIAN, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde, con lo cual el instrumento mide $2R_c$. Luego mide la

resistencia por los cables café y azul para finalmente restarle $2R_c$ al valor medido y obtener $R(t)$.

Con 4 hilos

El método de cuatro hilos es el más preciso de todos, los cuatro cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso.

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente I conocida a través de $R(t)$, provocando una diferencia de potencial V en los extremos de $R(t)$. Los cables 2 y 3 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia, luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables R_{c2} y R_{c3} será cero ($dV = I_c * R_c = 0 * R_c = 0$) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje (V) en los extremos del elemento $R(t)$. Finalmente el instrumento obtiene $R(t)$ al dividir V medido entre la corriente I conocida.

2.5.3 Propuesta del instrumento final de control: válvula proporcional

El objetivo principal del control de la presión a la entrada del hervidor es manipular el vapor de agua, por lo que se eligió una electroválvula proporcional, ya que abre o cierra automáticamente dependiendo de la acción que se requiera; esta manda la señal al controlador. En la tabla 6 se observan las especificaciones de la válvula.

Tabla 6. Especificaciones de la válvula proporcional

Descripción	Electroválvula proporcional de 0 a 100%
Marca	COPES VULCAN D-356088
Señal de salida	4 a 20 mA -24 VCD
Material	acero inoxidable

Válvula de Control con Posicionamiento. (Elemento de Acción Final)

Una válvula de control o válvula de regulación, es una válvula usada para controlar el flujo de un fluido, comportándose como un orificio de área continuamente variable, que modifica la pérdida de carga, según lo dirigido por la señal de un controlador. Esto permite el control del caudal y el control de las variables del proceso, tales como: presión, temperatura y nivel.

En la terminología de la técnica de regulación y control, la válvula es el órgano de control o elemento de control final [37].

Estructura de una Válvula de Control

Básicamente constan de un cuerpo que aloja en su interior al obturador (figura 23) y los asientos; y, externamente se hallan provistas de bridas o roscas para su acoplamiento a la tubería. Deben resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal a controlar y resistir la erosión o corrosión producida por el fluido. Suelen ser de hierro, acero o acero inoxidable y últimamente empiezan a realizarse con materiales termoplásticos.

El obturador puede tener desplazamiento lineal o rotativo y realiza la función de control de paso del fluido. Tanto él como los asientos suelen estar hechos con acero inoxidable. En algunas válvulas se utilizan obturadores y asientos cerámicos. Cuando la válvula se acciona mediante el actuador, se produce una modificación en el caudal del fluido, consiguiendo así la regulación de la variable del proceso [37].

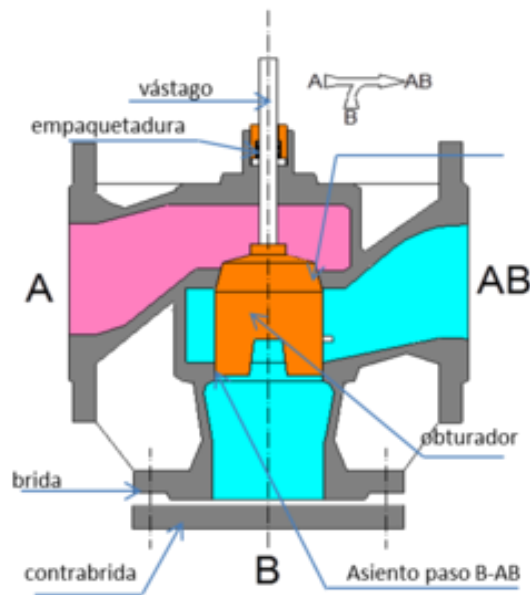


Figura 23. Estructura de una Válvula de Control.

Principio de Funcionamiento de las Válvulas de Control.

Las válvulas de control se encargan de regular el flujo y circulación tanto de líquidos como de gases en cualquier proceso industrial, evitando su regreso y estabilizando su presión. Para influir en el paso de los fluidos las válvulas de control se van abriendo o cerrando dependiendo de las necesidades del flujo, es decir, no necesariamente están totalmente cerradas ni totalmente abiertas, el nivel de uno u otro estado depende de las necesidades de flujo.

Básicamente una válvula de control está formada por un cuerpo principal, dentro del que se encuentran los asientos y el obturador. Estos elementos son los que contribuyen a definir el flujo que se necesita y así regularlo. Cuando el obturador libera u obstruye determinada superficie de la válvula es cuando el flujo varía aumentando o reduciéndose según la posición del obturador.

También se encuentra el actuador o motor de la válvula y al vástago. Este elemento se encarga de controlar el obturador. Al recibir una señal, el actuador la interpreta como un movimiento que se determina en función de la necesidad de un mayor o menor flujo. El vástago es el elemento con el que se interactúa físicamente para que se regule la posición del obturador. A la parte sellada del cuerpo principal se le llama asientos de la válvula. Estos son los que permiten un contacto total cuando la válvula está cerrada.

2.6 Los Controladores Lógicos Programables (PLC's)

Teniendo en cuenta los criterios analizados en el capítulo 1 en conjunto con los estándares de instrumentación y control de la empresa, para este proyecto finalmente se selecciona el PLC MITSUBISHI FX3U-32MR, considerando también que se cuenta con contratos de proveedores internacionales para garantizar suministros y repuestos de esta serie de autómatas.

Se entiende por Controlador Lógico Programable (PLC) o Autómata Programable a todo equipo electrónico, diseñado para controlar procesos secuenciales en tiempo real y en medio industrial. Su manejo y programación puede ser realizada por personal eléctrico o electrónico sin conocimientos informáticos. Realiza funciones lógicas: series, paralelos, temporizaciones, conteos y otras más potentes como cálculos, regulaciones, etc. [38].

Los FX3U-32MR constituyen una herramienta poderosa para la implementación de las prácticas en procesos industriales de automatización, gracias a sus características técnicas de desempeño en la gama media de PLC's, con entradas y salidas digitales y analógicas [38].

El PLC MITSUBISHI FX3U-32MR se seleccionó por la versatilidad que posee, además de tener integrado un PID, el cual se utiliza para la optimización de varios controles. Sus salidas son salidas a relé, característica indispensable, pues es un

relé el que controla la alimentación eléctrica de las válvulas neumáticas. De esta forma queda seleccionado el PLC para el desarrollo del diseño del sistema de automatización del circuito de rectificación.

2.6.1 Comunicaciones

El PLC FX3U-32MR tiene un módulo de comunicación para lo cual se requiere *software*. Este permite crear el *driver* de comunicación con lo cual se intercambia datos entre la pc del programador y el CPU del PLC. Principalmente por medio de una conexión con puertos serie Modbus RS485, serie Modbus RS232 por medio de cable de conexión UTP del protocolo *Ethernet*.

Los elementos del campo formados por válvulas y sensores están divididos en dos ramas, de los que, una es para las conexiones de señal de 4 - 20 mA utilizando el módulo de entrada analógica FX2n-8AD y la otra es la salida analógica hacia los elementos de acción final. En la figura 24, se muestra el protocolo de comunicación del PLC con los sensores y elemento de acción final; al no tener sistema de supervisión la computadora indica cómo se accede al PLC [20].

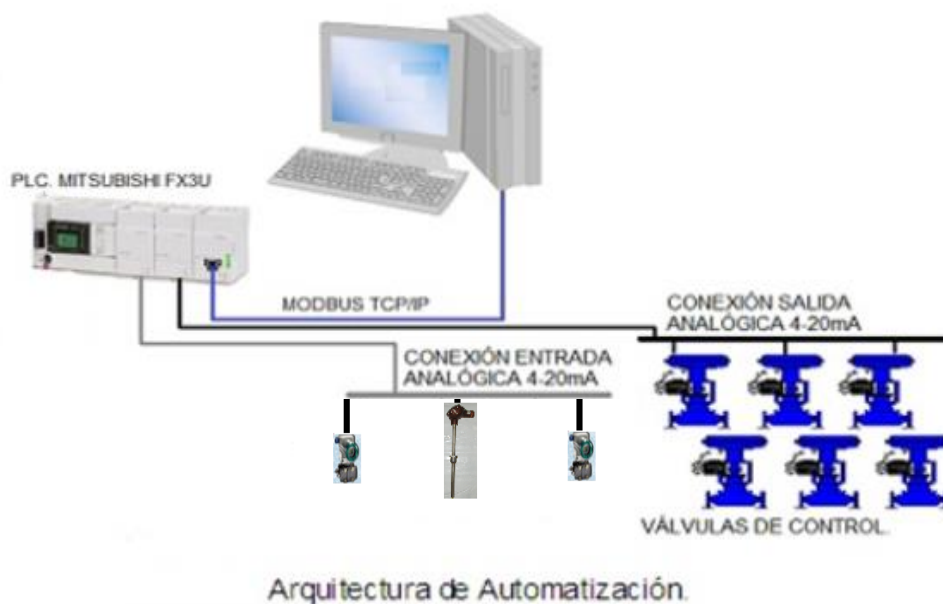


Figura 24. Diagrama de protocolos de comunicación.

2.6.2 Ventajas y desventajas de los PLC

Ventajas: [20]

- Menor tiempo de elaboración de proyectos.
- Posibilidad de añadir modificaciones sin costo añadido en otros componentes.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor costo de mano de obra.
- Mantenimiento económico.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con el mismo autómata.
- Menor tiempo de puesta en funcionamiento.

Desventajas: [20]

- Adiestramiento de técnicos.
- Costo elevado.

Fabricante: Mitsubishi FX3U-32MR

Las características clave del procesador reflejado en la tabla 7 incluyen:

- Retención de memoria del programa de aplicación y datos sin batería.
- Reloj en tiempo real integrado: sostenible durante 72 horas sin alimentación externa, a través de un sistema libre de mantenimiento.
- Súper condensador.
- Soporte para los siguientes protocolos de comunicación:
 - Serie Modbus RS485
 - Serie Modbus RS232
- Puerto I/O-Bus con conector DB9
- 2 puertos de conector RJ45:
 - 1 puerto fijo RS485 de 2 hilos
 - 1 puerto configurable RS232/RS485 de 2 hilos
- Páginas web de diagnóstico accesibles a través de USB.
- LED de diagnóstico para E/S, comunicación serie y estado de la CPU.

Tabla 7. Esquema Funcional del Sistema de Automatización

Especificación		Descripción
Temperatura	En funcionamiento	0° ...55° C (32° ...140° F)
	Almacenamiento	–40° ...85° C (–40° ...185° F)
Humedad		Máxima 96% (sin condensación)
Energía (desde la base de E/S)	Voltaje	24 VDC
	Corriente	500 mA máximo
Capacidad de memoria de retención		128 K bytes
Memoria de aplicación de usuario		3590 K bytes
Velocidad de reloj de la CPU		333 MHz
Puertos de comunicación		1 - Puerto serie configurable RS232/RS485 (canal 0)
		1 - Puerto serial fijo RS485 (canal 1)
		1 - Puerto USB
		1 - Puerto I/O-Bus

En el siguiente esquema (figura 25) se muestra la arquitectura piramidal del sistema de control, donde se puede observar en un primer nivel (nivel de campo) los sensores que toman las mediciones de nivel, flujo de agua, flujo de vapor, presión y temperatura. En el segundo se coloca el controlador del sistema, el cual es un PLC que trae los elementos necesarios para soportar el sistema propuesto. La estrategia de control se implementa usando la norma 4-20mA, la información brindada por los transmisores es llevada al módulo de entrada analógica del PLC usando el protocolo de comunicación MODBUS PLUS y este actúa sobre los elementos de acción final, mediante el supervisor el usuario puede observar el proceso y actuar sobre los controladores para ajustar los parámetros de los mismos en caso de ser necesario.

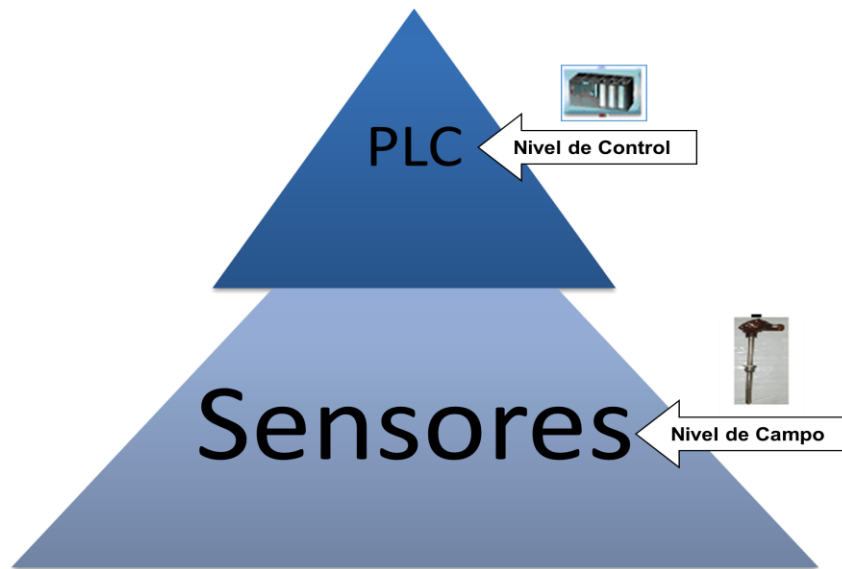


Figura 25. Nivel de automatización de la empresa

2.7 Valoración Económica y medioambiental.

A partir de la simulación de los controladores para el proceso de rectificación II, se estima que el controlador propuesto tiene un tiempo de asentamiento de 86 segundos y un sobrepaso de 12 %, menores que para el rendimiento del proceso actual.

2.7.1 Política de Seguridad de la Empresa.

La política de la Destilería “8 de Marzo”, es proporcionar condiciones de trabajo seguras y saludables a todos sus empleados. La responsabilidad primaria para mantener estas condiciones de trabajo seguras y saludables se logran con supervisión. Es trabajo de todos los supervisores a diferentes niveles hacer cumplir las regulaciones, instrucciones y disposiciones de la compañía al respecto. De igual manera es responsabilidad también de los supervisores que todos los trabajadores estén debidamente entrenados en el trabajo que realizan y conozcan todas las materias y materiales nocivos, así como las situaciones peligrosas que pueden suceder en el área de trabajo incluyendo los equipos de seguridad de la empresa. Es obligación de cada obrero cumplir todo el tiempo las regulaciones de salud y seguridad, usando los equipos y medios a su disposición.

Seguridad General.

Deben tenerse en consideración las siguientes precauciones:

- No entrar en áreas con atmósferas potencialmente contaminantes sin otro operador de la planta.
- Mantener libre el área de trabajo
- Mantener siempre escaleras, plataformas, etc., completamente despejadas de objetos y herramientas.
- Usar los recipientes adecuados para depositar materiales de desecho.
- Almacenar las herramientas, equipos y materiales en áreas que no interrumpen las operaciones de la planta.
- Usar siempre las botas de seguridad y espejuelos mientras permanezca en áreas de producción, mantenimiento y almacenes. La única excepción para el no uso en estas áreas es durante la permanencia en los cuartos de controles, mantener estos medios al alcance.
- La ropa de protección de goma o vinyl debe ser usada siempre que exista la posibilidad de contacto con soluciones calientes, sustancias químicas o corrosivas.

Protección de los ojos.

Todo el personal de operaciones debe usar anteojos para protegerse los ojos completamente cuando está en las áreas donde el ácido está circulando o es bombeado. Estos anteojos deben ser usados también cuando se manipulen válvulas en líneas de ácido, manipulación directa de ácido, o en cualquier otra situación donde exista la más remota posibilidad de salideros.

2.7.2 Valoración económica.

Como impacto económico de este trabajo puede plantearse que los modelos matemáticos dinámicos obtenidos para la etapa de rectificación II, posibilitan el estudio del comportamiento de las variables de interés (P_{vapor} y T_{p-54}) para diseñar una estrategia de control en la zona de rectificación que contribuya a garantizar un perfil óptimo de temperatura en el tope de cabeza de 78.8 °C.

Una vez implementada la estrategia de control se debe lograr un control eficiente de la temperatura, disminuyendo así el error humano; permitiendo que el operador ya no

necesite medir la temperatura manualmente, ni periódicamente, donde se puede producir accidentes por riesgo de altura, y pérdida de producción, afectando la calidad del alcohol clase A.

Por último, es importante recalcar que, el modelo obtenido abrirá un campo al personal para desarrollar nuevas investigaciones, ampliando sus conocimientos sobre el proceso.

Teniendo en cuenta las condiciones actuales, si se lograra cumplir en la destilería "8 de Marzo" con los índices de consumo de las materias primas y los nuevos ajustes en la automatización de la torre Rectificadora II, se reduciría el consumo de petróleo en un galón por HL de alcohol producido, representando un ahorro en lo producido con relación a los consumos actuales.

Se ha estimado que la no automatización es responsable del 18% de las pérdidas de la empresa, con un valor de \$ 422618,75. Se puede evaluar si es factible económicamente o no la instalación del sistema de control propuesto partiendo de un estimado del costo de dicha instalación, realizado a partir de la tabla 8 que reporta el costo en pesos cubanos al cual el MINAZ paga actualmente estos equipos.

Tabla 8. Costos de materiales

Equipo	Costo del equipo
Controlador Mitsubishi FX3U-32MR	\$ 36049,43
Válvula automática	\$ 2 656
Sensor transmisor de presión	\$ 35973
Sensor transmisor de temperatura	\$2460
Cable flexibles 3x1 mm	\$ 109
Tubería aluminio $\frac{3}{4}$. 3 m c/u	\$ 6,5
Letra tipo L $\frac{3}{4}$	\$ 51,36
Letra tipo C $\frac{3}{4}$	\$ 36,9
Total de gasto	\$ 77 342,19

El costo del lazo propuesto a instalar es aproximadamente de \$ 77342,19 en pesos cubanos. En el caso de este proyecto, el tiempo en que se recupera la inversión es aproximadamente el período que transcurre un período de zafra azucarera, y con los niveles de ahorro se hace factible la inversión.

Conclusiones

En este capítulo se describieron los experimentos realizados para determinar los modelos de comportamiento de la temperatura en el plato 54. El procesamiento de los datos obtenidos se hizo a través del MATLAB con el cual se obtuvieron modelos lineales de tipo amx2221.

En la obtención de los modelos se tuvo en cuenta la interacción existente entre la temperatura frente a los cambios en el flujo de presión de vapor, así como la influencia de perturbación para que el sistema se mantuviera estable para el desarrollo de los experimentos en este proceso. Se realizó la validación de los modelos mostrando un grado de aproximación aceptable entre los mismos y el sistema.

CONCLUSIONES GENERALES

A pesar del significativo esfuerzo realizado en la investigación para propiciar una vía confiable para modelar y simular la torre de Rectificación II de la Destilería “8 de marzo”, el conocimiento de tales procedimientos es aún esencialmente incompleto, en particular dentro de la destilería al trabajar con grandes volúmenes de producto final, a la cual está ligado el presente estudio con el que se alcanzaron los resultados siguientes:

- Se caracterizó el proceso objeto de la rectificación II y se determinaron las principales variables a partir de su análisis como sintonía de regulación automática, resultando un sistema multivariable.
- Se obtuvieron los modelos aproximados sobre la base de la identificación experimental de la presión de vapor y de las temperaturas en la torre de rectificación II ante cambios tanto positivos como negativos en dicha presión de vapor.
- Se realizó la validación de los modelos matemáticos obtenidos *Auto Regressive Moving Average Xogen*, los cuales brindaron ajustes de 61 % y además se apreció un comportamiento aceptable de los residuos.
- A pesar de lo relativamente grueso de esta aproximación, la identificación permitió no sólo llegar a una descripción dinámica del proceso, sino también conocer mejor el equipo para contribuir a su funcionamiento más eficiente.
- Se propusieron los valores del controlador PID que mejor simulaban el comportamiento real del proceso ($K_c=154,7137$; $T_i=3,3938$; $T_d=94,8437$).

RECOMENDACIONES

- Diseñar una estrategia de control inteligente para el proceso de rectificación II a partir del modelo amx, propuesto en la investigación. Una estrategia de control a explorar puede ser de la familia de los controladores PID con los parámetros ya calculados que se proponen. Estos controladores transformarían el problema de estabilizar las salidas para valores deseados fijos en la empresa de Destilería “8 de Marzo”, C.A.I. Urbano Noris, Holguín.
- Identificar subproceso de rectificación con redes recurrentes para comparar los resultados obtenidos con el modelo amx.
- Que a partir de los modelos obtenidos se investiguen diferentes estrategias de control para el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. H. Ray, "Multivariable Process Control-A Survey", *Computers & Chem. Eng.*, v.7, n.367,, 1983.
- [2] D.M. González, H.R. Echevarría, y A.P. Hernández, *Termodinámica para ingenieros químicos*, Ciudad de La Habana: Editora ISPJAE, 1987.
- [3] G. R. Pérez, "Identificación experimental del proceso de precalentamiento de licor de la planta lixiviación en la empresa Comandante Pedro Sotto Alba", Tesis, Departamento de Eléctrica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa: Holguín, 2014, [En línea], Disponible en <https://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/2323> . [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [4] J. B. Leyes Franco, D. R. Navarrete Díaz. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de Labview, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2018, [En línea], Disponible en <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/44272/D-83850> . [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [5] E. Ormeño, M. Vivert, C. Martin, Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de presión en una planta de refrigeración, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2011, [En línea], Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/16606>. [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [6] P. Aguirre Marrett y A. Larco-Torres, Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de temperatura en un cuarto térmico, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2010, [En línea], Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11695>. [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [7] J. Salcedo, R. Rivas y J. J. Sotomayor, Design of a generalized predictive controller for temperature control in a cement rotary kiln. *IEEE Latin America Transactions*, v.16, no. 8, 2018, [En línea], Disponible en <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8362131> . [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [8] J. Salcedo, R. Rivas y J. J. Sotomayor, Design of a Robust H2 State Feedback Temperature Controller for a Steel Slab Reheating Furnace, *Appl Sci*, v. 10, no. 5, 2020, [En línea], Disponible en <https://doi.org/10.3390/app10051731>. [Accedido: Sept. 15, 2023]

- [9] T. Devashena, K. Dhanalakshmi. Simultaneous measurements for the interlink of electro thermo-mechano-electro characteristics in shape memory springs. *ISA Transactions*, v. 10, no. 5, 2022, [En línea], Disponible en <https://doi.org/10.3390/app10051731>. [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [10] Stavropoulos P, Papacharalampopoulos A, Michail CK, Chrysosolouris G. Robust Additive Manufacturing Performance through a Control Oriented Digital Twin. *Metals*. 2021.
- [11] H.O.N Galarza, "Evaluación de las condiciones de la fermentación alcohólica utilizando *Saccharomyces cerevisiae* y jugo de caña de azúcar como sustrato para obtener etanol", Tesis de grado, Departamento de Ciencias de la Vida, Ingeniería en Biotecnología, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, 2019.
- [12] F.G.O. Fonseca, "Elaboración de alcohol rectificado a partir de la melaza en la empresa agroindustrial", Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2022.
- [13] F.L. Doménech, "Aspectos tecnológicos de la fermentación alcohólica". ICIDCA, Informe técnico, 2019.
- [14] R.E. Treybal, Operaciones con Transferencia de Masa, 2^{da}. ed., Nueva York: McGraw Hill, 1984.
- [15] A.G. Kasatkin, Operaciones Básicas y Aparatos en la Tecnología Química, 8^{va}. ed. Vol. II, Moscú: Editorial Química, 1986.
- [16] R.Q. Brewster, C.A. Vanderwert, y W.E. McEwen, Curso práctico de química orgánica, 2da. ed, La Habana: Editorial Ciencia y Técnica, 1971.
- [17] G.G. Brown, Operaciones básicas de la Ingeniería Química. 1^{ra}. ed. Cubana, Vol. II. La Habana: Editorial Ciencia y Técnica, 1969.
- [18] J.E. Garniga Guerra, "Análisis y evaluación de variables en la etapas de fermentación y destilación para mejorar los niveles de producción y calidad del alcohol etílico rectificado en la UEB Urbano Noris", Tesis de grado, Departamento de Ingeniería en Procesos Agroindustriales, Universidad de Holguín, Holguín, 2013, [En línea], Disponible en <https://repositorio.uho.edu.cu/handle/uho/5797>. [Accedido: Sept. 15, 2023]
- [19] M. I. Valdés Oajaca, "Implementación de un sistema por lotes para pirólisis a escala planta piloto en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala", Tesis, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2023, [En línea], Disponible en

- <https://repositorio.uvq.edu.gt/mxlu/handle/123456789/4712>. [Accedido: Sept. 15,2023]
- [20] Brown, G.G., Operaciones básicas de la Ingeniería Química. 1ª ed. Cubana, Vol. II. 1969.
- [21] J. Acedo Sánchez, Control avanzado de proceso: Teoría y práctica, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2023, pp. 459-531
- [22] P. Arafet, Monografía sobre identificación de sistemas, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2004.
- [23] L. Ljung, System Identification: Theory for the User. New Jersey, Estados Unidos de América: Prentice-Hall, 1987.
- [24] T. Söderstrom y P. Stoica, System Identification. Portland, Oregon, Estados Unidos de América: Prentice-Hall International, 1989.
- [25] L. Zadeh, From circuit theory to system theory, In Proc. IRE 50, 1962.
- [26] Y. Zhu, "Multivariable process identification for MPC: the asymptotic method", *Journal of Process Control And its applications* Vol. 8, No.2, p. 101-115, 1998.
- [27] M. Irizar, "La inteligencia computacional en la identificación de sistemas" *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. Vol. XXVI, No. 1, p. 35-41, 2018.
- [28] M. M. Ramírez, "Identificación experimental del subproceso de postcombustión en un horno de reducción de níquel". *Revista Minería y Geología*, Vol. XVII I, No. 2, 2001.
- [29] A.R. Chang, "Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato-amoniaco", *Minería y Geología*, Vol. 16, No. 1, pp. 76-82, 1999.
- [30] MathWorks, MATLAB R2022a, (versión 9.12.0.1884302), Massachusetts, Estados Unidos de América, MathWorks Inc., 2022.
- [31] L. Ljung, L. Guo, "The role of model validation for assessing the size of the unmodeled dynamics", *IEEE Transactions on automatic control*, Vol. 42, No. 9, pp. 1230-1239, 1997.
- [32] L. Galindo, "Una Metodología Básica para el Desarrollo de Sistemas", Memorias del 3er. Congreso Internacional de la Metodología de la Ciencia y de la Investigación para la Educación, Campeche, México, Mar., 2018.

- [33] Siemens, “Instrumentos para medida de presión SITRANS P” 2020. [En línea]. Disponible en <https://www.siemens.com/sitransp>. [Accedido Oct. 3, 2023].
- [34] D.E. Cuenca de la Vara, “Elementos de medición y tecnología utilizada en el área de calderas de la planta termoenergética en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara”, *Ciencia & Futuro*, para. 9, [En línea], Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/1794>. [Accedido: Oct. 3, 2023].
- [35] W. M. Dávila López y J. N. Culquitante Chávez, “Diseño de la automatización de la troqueladora de la empresa calzados Miguel Ángel”, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada Antenor Orrego, Lima, Perú, 2017. [En línea]. Disponible en <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/3605>. [Accedido: Oct. 3, 2023].
- [36] H. J. Aguilar Ramírez y J. Mayanga Contreras, “Diseño e implementación de cámaras de crecimiento para plantas con control de temperatura e iluminación para el programa de Biología”, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/4527>. [Accedido: Oct. 3, 2023].
- [37] S. S. Álvarez Pinto, “Válvula dómotica para control de flujo en los registros de agua y gas”, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería en Control, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.udistrital.edu.co/handle/11349/14165>. [Accedido: Oct. 5, 2023].
- [38] L. F. Palma Pozo y S.E. Sangopanta Ardilla, “Diseño de un PLC con microcontrolador PIC 16F873”, Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba, 2011. [En línea]. Disponible en <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1049>. [Accedido: Oct. 3, 2023].

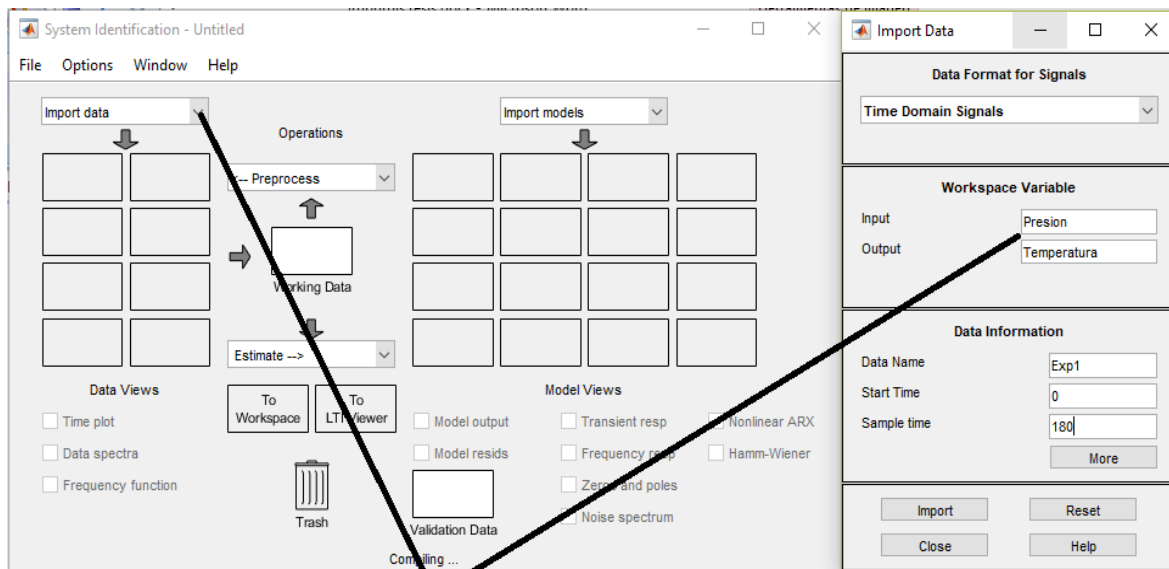
ANEXOS



Anexo 1. Plato de campanas con bajantes.

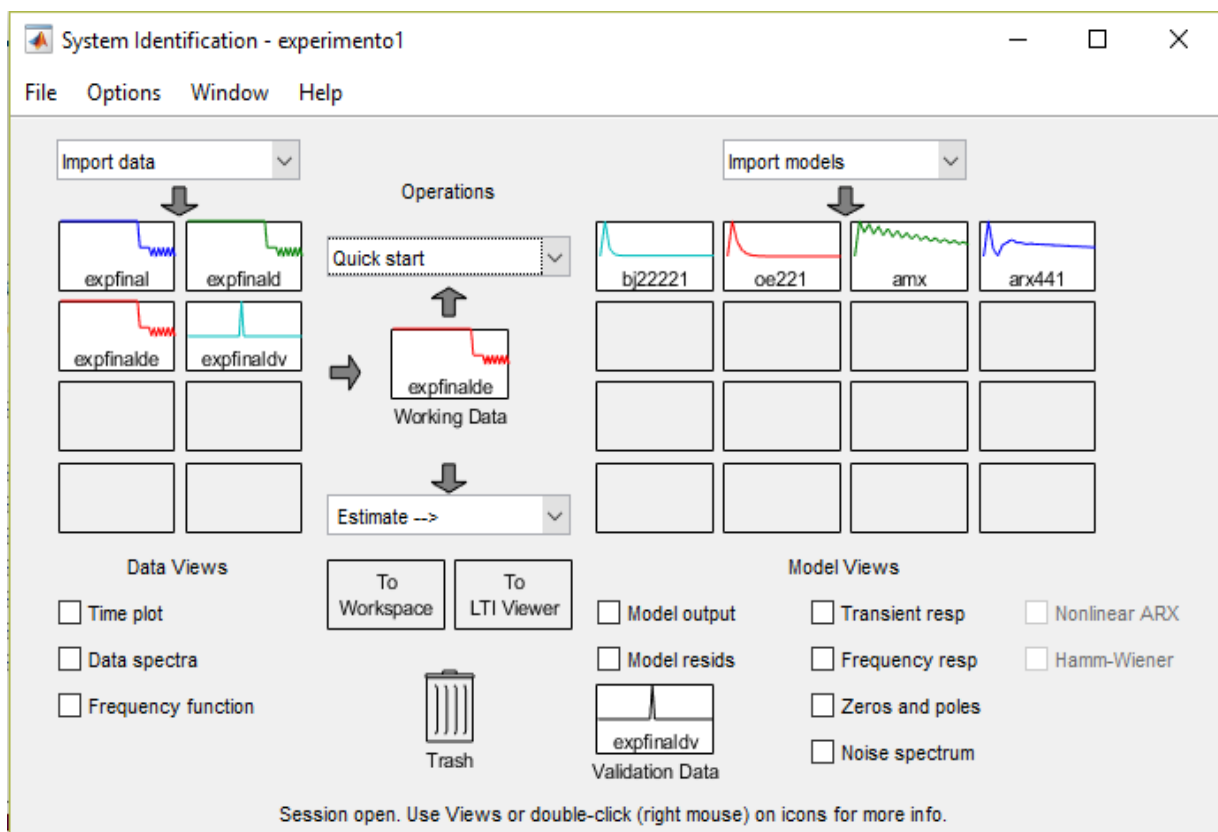


Anexo 2. Instrumento para medir la temperatura Testo 845.



**Cargar datos
desde el area del
Matlab**

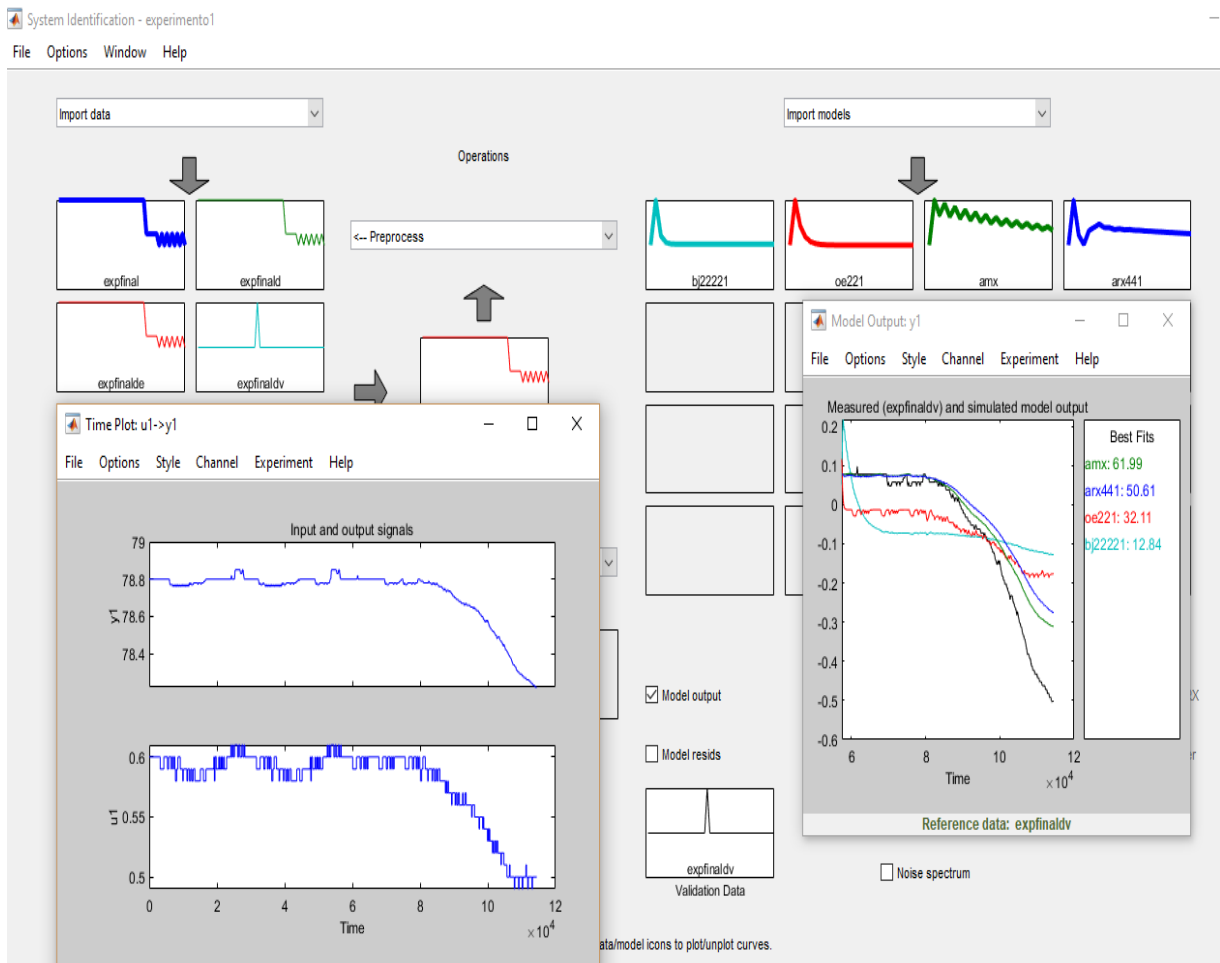
Anexo 3. Funciones del SIT para el preprocesamiento de los datos



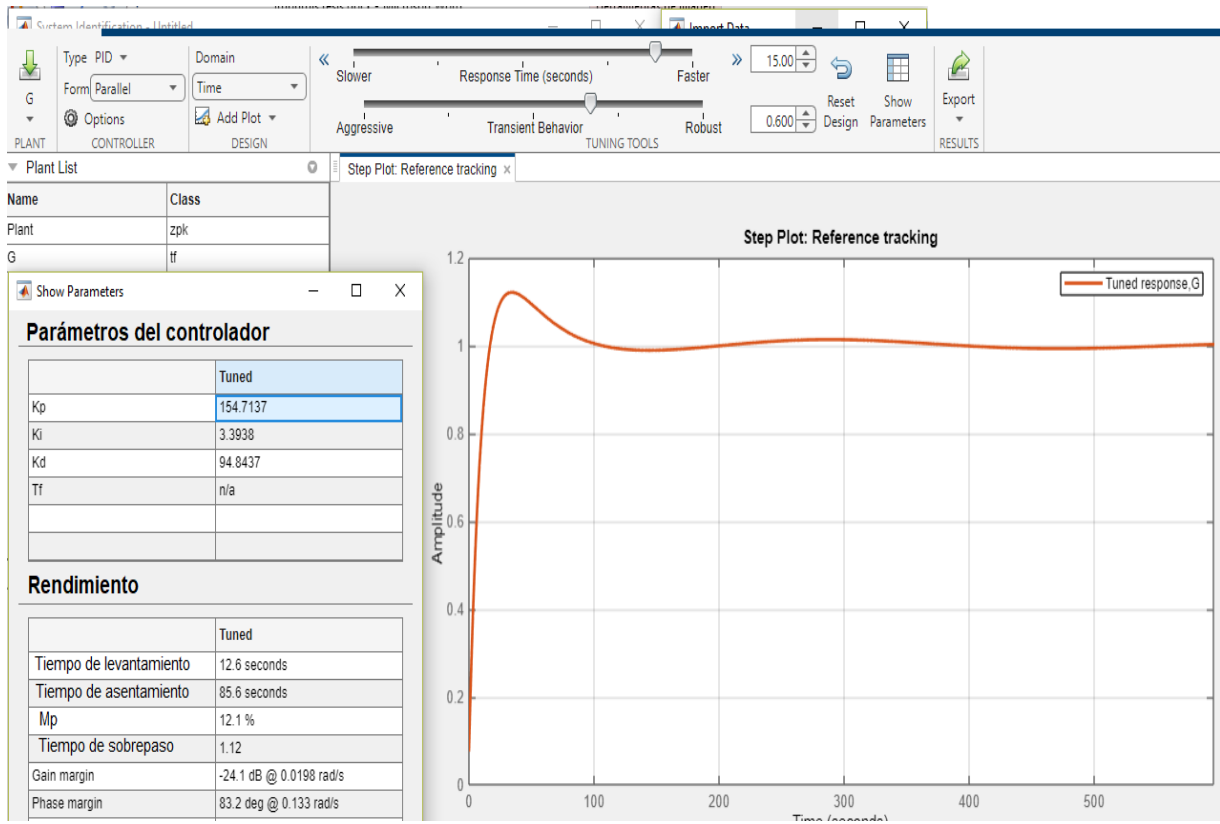
Anexo 4. Menú Preprocesamiento

Select range (Solo se usa para datos en el dominio del tiempo): Permite seleccionar porciones de datos para usarlos con fines de estimación validación.

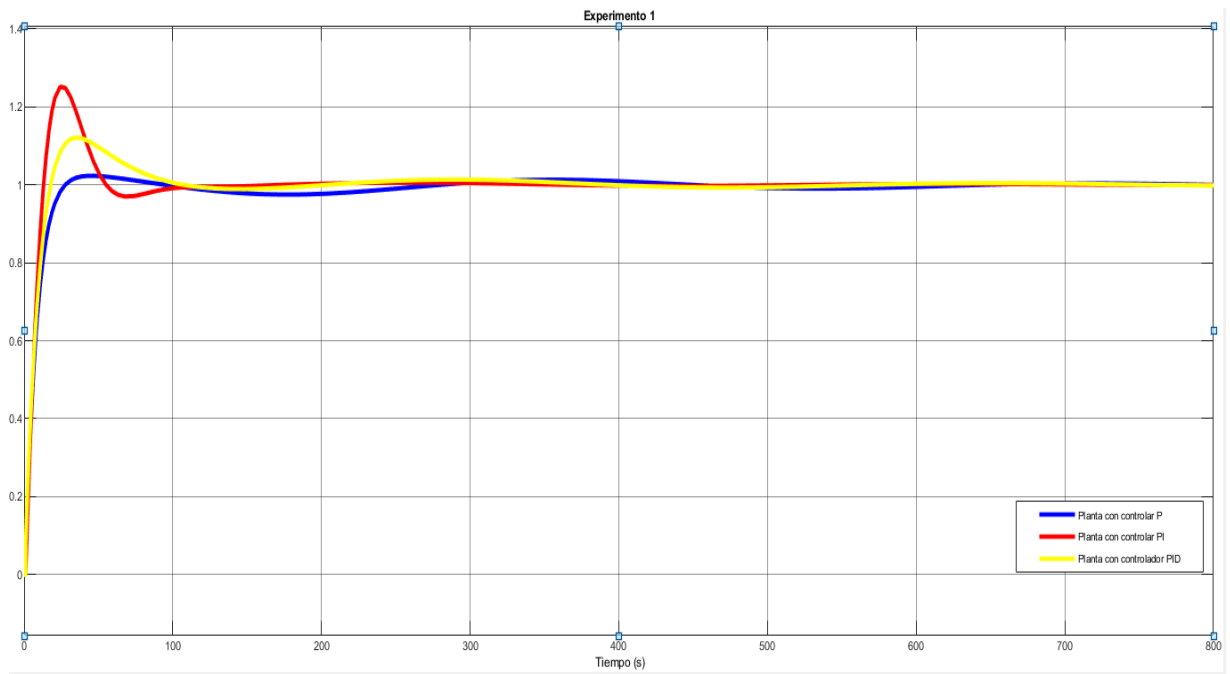
Quick start: Crea tres nuevos conjuntos de datos a partir del conjunto de datos que se encuentra en el Working Data. Primero se remueven los valores medios, luego estos datos se dividen en dos mitades, (la primera mitad se usa para estimación y la segunda para validación. Este comando además abre gráfica temporal de los datos de entrada – salida.



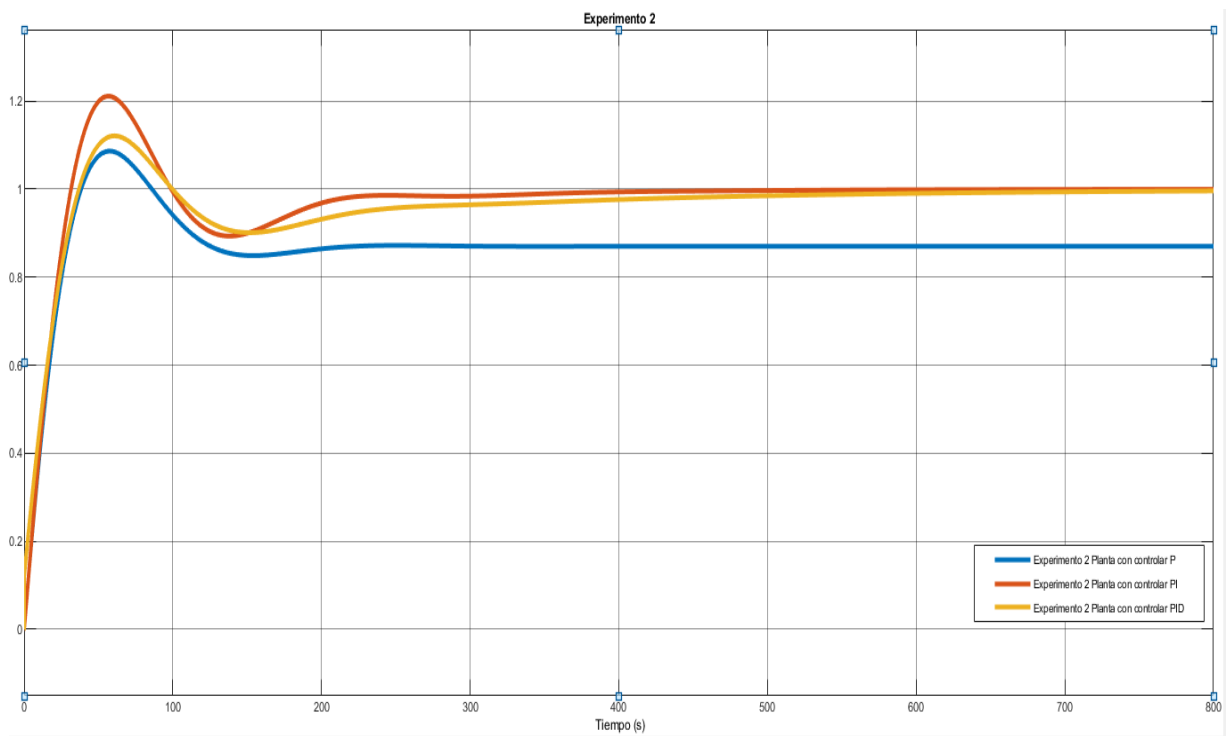
Anexo 5. Gráficas para el análisis de los datos



Anexo 6. Herramienta PIDTool en el programa Matlab



Anexo 7. Respuestas de los controladores del experimento 1 en el simulink



Anexo 8. Respuestas de los controladores del experimento 2 en el simulink