



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**“SIMULACIÓN DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO
(CDU) EN DWSIM”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JULIÁN ANDRÉS OSORIO GETIAL

DIRECTOR: ING. CRISTINA GABRIELA CALDERÓN TAPIA, MSc.

Riobamba - Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**“SIMULACIÓN DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO
(CDU) EN DWSIM”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JULIÁN ANDRÉS OSORIO GETIAL

DIRECTOR: ING. CRISTINA GABRIELA CALDERÓN TAPIA, MsC.

Riobamba - Ecuador

2024

©2024, Julián Andrés Osorio Getial

Se autoriza la reproducción total o parcial con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Julián Andrés Osorio Getial, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de abril de 2024

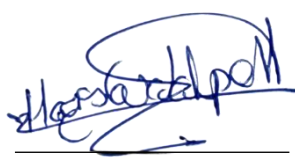




Julián Andrés Osorio Getial

180422160-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**SIMULACIÓN DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO (CDU) EN DWSIM**”, realizado por el señor: **JULIÁN ANDRÉS OSORIO GETIAL**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Maria Augusta Guadalupe Alcoser PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-04-16
Ing. Cristina Gabriela Calderón Tapia, MsC. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-04-16
Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy, Mgs. ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-04-16

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Harold Osorio y Emilse Getial, mis padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor inspiración y motor para alcanzar mis metas. A mi familia y a todas aquellas personas cercanas que, con su cariño y confianza en mí, han sido parte fundamental de este camino. Gracias por creer en mí. Además, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi abuelo Marcos Samudio, quien cuidó de mí desde que era pequeño hasta el día que me acompañó en este proceso. A pesar de no estar presente para leer estas palabras, su compañía y preocupación han sido pilares en mi formación, y por ello, le estoy eternamente agradecido.

Julián

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, quienes no solo me han brindado un apoyo incondicional a lo largo de este viaje académico, sino que también me han inculcado valores fundamentales como el respeto, el esfuerzo, la responsabilidad y la dedicación, los cuales han sido pilares en mi formación. A mi querido hermano, por su compañía y apoyo emocional durante este proceso, que ha sido fundamental para mi bienestar y motivación.

Agradezco también a mis nuevos amigos, cuyo encuentro fue posible gracias a esta etapa académica, y a aquellos amigos que, aunque lejos físicamente, siempre estuvieron presentes con su apoyo y atención.

Este camino no hubiera sido lo mismo sin las personas que dejaron una huella imborrable en mi vida, especialmente aquella figura que ya no está físicamente pero que fue mi guía y compañero durante todo este proceso. Su recuerdo y enseñanzas perdurarán en mí para siempre.

Agradezco de manera especial al Ing. Daniel Chuquín por brindarme la oportunidad, confianza y apoyo para llevar a cabo este proyecto, así como a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por ofrecerme un espacio de desarrollo académico donde he podido crecer y aprender. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por formar parte de este camino y por contribuir a mi crecimiento personal y profesional.

Julián

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY/ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de investigación.....	6
2.1.1. <i>Simulación del proceso de destilación de crudo</i>	6
2.1.1.1. <i>Simulaciones Rigurosas en la destilación de crudo</i>	6
2.1.1.2. <i>Diseño de controladores en base a simulaciones</i>	7
2.1.1.3. <i>Reacondicionamiento con uso de simuladores</i>	8
2.1.1.4. <i>Optimización del proceso de destilación de crudo</i>	9
2.1.1.4.1. <i>Ahorro energético en el proceso de destilación de crudo</i>	10
2.1.2. <i>Redes neuronales artificiales en diferentes procesos de destilación</i>	12
2.1.2.1. <i>Destilación y redes neuronales</i>	12
2.1.2.2. <i>Destilación por membrana</i>	13

2.1.2.3.	<i>Destilación al vacío</i>	14
2.1.2.4.	<i>Destilación de crudo</i>	14
2.2.	Referencias Teóricas	16
2.2.1.	<i>Composición del crudo</i>	16
2.2.2.	<i>Productos de Refinación</i>	17
2.2.3.	<i>DWSIM</i>	19
2.2.3.1.	<i>Características de DWSIM</i>	20
2.2.4.	<i>ChemSep</i>	21
2.2.4.1.	<i>Características de ChemSep</i>	22
2.2.5.	<i>Redes Neuronales Artificiales</i>	23
2.2.6.	<i>Neural Network Toolbox de MATLAB</i>	24

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	25
3.1.	Metodología empleada	25
3.2.	Etapas de la metodología	25
3.3.	Determinación de parámetros importantes	26
3.3.1.	<i>Descripción del proceso</i>	27
3.3.2.	<i>Destilación TBP en el proceso</i>	29
3.3.3.	<i>Condiciones Operativas para el proceso</i>	29
3.3.4.	<i>Método de prueba ASTM D86</i>	31
3.4.	Simulación mediante DWSIM	32
3.4.1.	<i>Proceso aplicado para la simulación en DWSIM</i>	32
3.4.2.	<i>Creación del crudo a tratar</i>	33
3.4.3.	<i>Selección del paquete termodinámico</i>	38
3.4.4.	<i>Configuración de las entradas</i>	39
3.4.5.	<i>Planteamiento de las condiciones de operación</i>	40
3.5.	Validación de la simulación	48
3.6.	Tratamiento de datos (Creación de base de datos)	50
3.7.	Diseño de la RNA (Red Neuronal Artificial) en Matlab	51
3.8.	Entrenamiento y aprendizaje de la RNA	52
3.9.	Análisis estadístico	54

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN.....	55
4.1.	Resultados de la simulación en DWSIM.....	55
4.2.	Verificación de los resultados de la simulación.....	56
4.3.	Resultados del entrenamiento de la RNA	58
4.4.	Resultados del diseño de la RNA	61
4.4.1.	<i>Rendimiento de la RNA</i>	<i>61</i>
4.5.	Resultados obtenidos con la predicción de la RNA.....	63
4.5.1.	<i>Estudio de las predicciones de la RNA.....</i>	<i>63</i>
4.5.1.1.	<i>Datos predichos en el adiestramiento</i>	<i>63</i>
4.5.1.2.	<i>Datos predichos en la validación externa</i>	<i>67</i>
4.6.	Resultados del análisis estadístico	70
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características de DWSIM	21
Tabla 2-2: Características de ChemSep	22
Tabla 3-1: Destilación TBP del crudo Tia Juana	29
Tabla 3-2: Parámetros de diseño para el proceso de destilación en la CDU.....	29
Tabla 3-3: Condiciones Operativas para el proceso completo de destilación.....	30
Tabla 3-4: Tipo de producto y calidad [ASTM D86]	32
Tabla 3-5: Variable de entrada para la RNA.....	50
Tabla 3-6: Variables de salida para la RNA.....	50
Tabla 4-1: Flujos Volumétricos obtenidos en DWSIM.	56
Tabla 4-2: Verificación y validación de la simulación en DWSIM.....	57
Tabla 4-3: Resultados de MSE y R en el entrenamiento de la RNA en MATLAB.....	58
Tabla 4-4: Error Cuadrático Medio (MSE) del entrenamiento final de la RNA.....	61
Tabla 4-5: Resultados del análisis estadístico ANOVA.	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Moléculas de Hidrocarburos	16
Ilustración 2-2: Petróleo y algunos de sus componentes derivados	17
Ilustración 2-3: Fracciones primarias obtenidas de la destilación del crudo junto con sus propiedades y usos	19
Ilustración 2-4: Interfaz de DWSIM.....	20
Ilustración 2-5: Interfaz de ChemSep.....	22
Ilustración 2-6: Estructura Algorítmica de una red neuronal artificial (ANN).	24
Ilustración 3-1: Unidad de destilación de crudo usada base.....	28
Ilustración 3-2: Configuración de la Unidad de Destilación de Crudo a estudiar	28
Ilustración 3-3: Interfaz Inicial de DWSIM.	33
Ilustración 3-4: Pestaña de Introducción para la configuración de la simulación.	34
Ilustración 3-5: Interfaz de adición de compuestos para la simulación.....	35
Ilustración 3-6: Selección de la curva de destilación	35
Ilustración 3-7: Ingreso de los datos de la curva de destilación TBP.....	36
Ilustración 3-8: Curva de destilación “Tia Juana” y pseudocomponentes	37
Ilustración 3-9: Elección de métodos y correlaciones para cálculo de propiedades de pseudocomponentes	37
Ilustración 3-10: Propiedades calculadas de los pseudocomponentes creados.	38
Ilustración 3-11: Selección de paquetes termodinámicos.	39
Ilustración 3-12: Sistema de Unidades a usar en la simulación.....	39
Ilustración 3-13: Valores de entrada del crudo a tratar	40
Ilustración 3-14: Selección de la columna para el proceso de destilación.	40
Ilustración 3-15: Selección de la Columna ChemSep.	41
Ilustración 3-16: Diseño inicial de la CSCOL-1	42
Ilustración 3-17: Propiedades operativas de la columna CSCOL-1	42
Ilustración 3-18: Presión a la que trabaja CSCOL-1.....	43
Ilustración 3-19: Condiciones operativas para los pump-arounds de CSCOL-1.....	43
Ilustración 3-20: Especificación operativa de la columna CSCOL-1.....	44
Ilustración 3-21: Condiciones operativas iniciales para los sidestreams.....	44
Ilustración 3-22: Flowsheet inicial de la CDU (sin side-strippers).	45
Ilustración 3-23: Side-stripper de HN antes de la recirculación.....	46
Ilustración 3-24: Flowsheet de la Unidad de Destilación de Crudo sin retornos.	46

Ilustración 3-25: Flowsheet de la Unidad de Destilación de Crudo con bloques lógicos de recirculación.....	47
Ilustración 3-26: Diseño final de la CSCOL-1.....	48
Ilustración 3-27: Cooler para enfriamiento de LN.....	48
Ilustración 3-28: Tabla de propiedades maestra para la Unidad de Destilación de Crudo (CDU).	49
Ilustración 3-29: Unidad de Destilación de Crudo en DWSIM.....	49
Ilustración 3-30: Base de datos a ingresar en Matlab.....	51
Ilustración 3-31: Ingreso de las entradas y salidas en la herramienta “Neural Net Fitting” de Matlab.....	52
Ilustración 3-32: Distribución de datos para el entrenamiento, validación y testeo de la red neuronal.....	53
Ilustración 3-33: Algoritmos matemáticos disponibles para el entrenamiento de la red neuronal.	53
Ilustración 4-1: Simulación final del fraccionamiento de crudo en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU).....	55
Ilustración 4-2: Resultados de la simulación en la interfaz de DWSIM.....	56
Ilustración 4-3: Entrenamiento de la RNA con los tres algoritmos que dispone MATLAB.....	60
Ilustración 4-4: Estructura de la RNA diseñada en MATLAB.....	61
Ilustración 4-5: Disminución del MSE durante el adiestramiento de la RNA.....	62
Ilustración 4-6: Correlación lineal entre las entradas y salidas de la RNA.....	62
Ilustración 4-7: Predicción del Flujo Volumétrico de LN en el adiestramiento.....	64
Ilustración 4-8: Predicción del Flujo Volumétrico de HN en el adiestramiento.....	64
Ilustración 4-9: Predicción del Flujo Volumétrico de LD en el adiestramiento.....	65
Ilustración 4-10: Predicción del Flujo Volumétrico de HD en el adiestramiento.....	66
Ilustración 4-11: Predicción del Flujo Volumétrico de RESIDUE en el adiestramiento.....	66
Ilustración 4-12: Predicción del Flujo Volumétrico de LN en la validación externa.....	67
Ilustración 4-13: Predicción del Flujo Volumétrico de HN en la validación externa.....	68
Ilustración 4-14: Predicción del Flujo Volumétrico de LD en la validación externa.....	68
Ilustración 4-15: Predicción del Flujo Volumétrico de HD en la validación externa.....	69
Ilustración 4-16: Predicción del Flujo Volumétrico de RESIDUE en la validación externa.....	70
Ilustración 4-17: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de LN.....	72
Ilustración 4-18: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de HN.....	72
Ilustración 4-19: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de LD.....	73
Ilustración 4-20: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de HD.....	73
Ilustración 4-21: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de RESIDUE.....	74

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: BASE DE DATOS CREADA PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA RNA.

ANEXO B: VARIABLES USADAS EN EL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA LA CREACIÓN DE LA RNA EN MATLAB.

ANEXO C: CÓDIGO PARA EL DISEÑO, ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DE LA RNA EN MATLAB.

ANEXO D: ERRORES PORCENTUALES REGISTRADOS EN EL ADIESTRAMIENTO DE LA RNA.

ANEXO E: ERRORES PORCENTUALES REGISTRADOS EN LA VALIDACIÓN EXTERNA DE LA RNA.

RESUMEN

En el trabajo presentado se tuvo como objetivo el crear un red neuronal artificial (RNA) la cuál sea capaz de dar datos acertados en base a una predicción del comportamiento de una unidad de destilación de crudo (CDU) cambiando las especificaciones del crudo y obteniendo así las composición de los productos finales de interés a diferentes valores de Temperatura (T) y otras variables más que resultan importantes al momento de operar una torre de fraccionamiento de crudo, reconociendo así que la temperatura a la que existe %VAP es las que afectan al proceso mediante análisis de las curvas de destilación TBP. El diseño, entrenamiento y validación de la red se la realizó en MATLAB recogiendo datos en el programa de código abierto DWSIM validando los resultados de simulación con publicaciones de alto impacto que usan Aspen HYSYS siendo este uno de los más usados a nivel industrial por la cantidad de herramientas y datos que este programa le da al usuario para una aplicación acertada. El diseño de la red se lo realizó con 325 datos para su entrenamiento y 25 datos para su validación, la arquitectura de esta tiene 10 entradas, 20 neuronas ocultas y 5 salidas usando para su entrenamiento el algoritmo Bayesian Regularization (BR) obteniendo un Error Cuadrático Medio (MSE) de 2.6904 E-04 y un coeficiente de Regresión Lineal (R) de 0.9971. La capacidad de predicción de la red se la analizó mediante una comparación de los errores porcentuales promedio en la validación externa obteniendo 0.66, 2.23, 0.57, 0.68 y 0.48 para LN, HN, LD, HD y RESIDUE respectivamente y se respaldó estos valores mediante un análisis estadístico usando el método ANOVA determinando que no hay una diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza de 95%. Se recomienda usar este trabajo para futuros estudios sobre el RESIDUE y la separación en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) al vacío.

Palabras clave: < CRUDE DISTILLATION UNIT (CDU) >, < UNIDAD DE DESTILACIÓN DE CRUDO >, < PETRÓLEO >, < TRUE BOILING POINT (TBP) >, < RED NEURONAL ARTIFICIAL >, < DWSIM (SOFTWARE) >, < MATLAB (SOFTWARE) >, < ANOVA >

0414-DBRA-UPT-2024



SUMMARY/ABSTRACT

The objective of the work presented was to create an artificial neural network (ANN) which is capable of providing accurate data based on a prediction of the behavior of a crude distillation unit (CDU) by changing the specifications of the crude and thus obtaining the composition of the final products of interest at different values of temperature (T) and other variables that are important when operating a crude fractionation tower, therefore recognizing that the temperature at which there is %VAP is the one that affects the process by analyzing the TBP distillation curves. The design, training and validation of the network was performed in MATLAB collecting data in the open-source program DWSIM validating the simulation results with high impact publications using Aspen HYSYS being this one of the most used at industrial level by the number of tools and data that this program gives the user for a successful application. The network design was carried out with 325 data for training and 25 data for validation, its architecture has 10 inputs, 20 hidden neurons and 5 outputs using the Bayesian Regularization (BR) algorithm for training, obtaining a Mean Squared Error (MSE) of 2.6904 E-04 and a Linear Regression coefficient (R) of 0.9971. The predictive capacity of the network was analyzed by comparing the average percentage errors in the external validation, obtaining 0.66, 2.23, 0.57, 0.68 and 0.48 for LN, HN, LD, HD and RESIDUE respectively, and these values were supported by a statistical analysis using the ANOVA method, determining that there is no statistically significant difference at the 95% confidence level. It is recommended to use this work for future studies on RESIDUE and separation in a Crude Distillation Unit (CDU) under vacuum.

Keywords: < CRUDE DISTILLATION UNIT (CDU) >, < CRUDE DISTILLATION UNIT >, < OIL >, < TRUE BOILING POINT (TBP) >, < ARTIFICIAL NEURAL NETWORK >, < DWSIM (SOFTWARE) >, < MATLAB (SOFTWARE) >, < ANOVA >



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

El crudo o petróleo llamado comúnmente es una materia prima altamente requerida alrededor de todo el mundo y que hace más de un siglo fue su primera extracción, los diferentes productos que de este se obtienen han sido temas de estudios en los últimos años, específicamente en un mayor aprovechamiento de esta materia prima, obtener más producto a un menor precio para la industria. Para este problema se le dan soluciones las cuales se analizan en el campo y también de manera computacional siendo esta una de las alternativas más viables para la industria ya que no existe gasto ni pérdida en estos estudios. La simulación de los procesos químicos es pues la respuesta y la herramienta a usar para diseñar, estudiar, optimizar, experimentar y rediseñar los procesos presentes en una industria e incluso al ser una tecnología computacional se puede trabajar a la par con otros programas acorde a las necesidades del usuario, por ejemplo, la inteligencia artificial. Este trabajo plantea la creación de una Red Neuronal Artificial (RNA) con el objetivo de aplicarla en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) y así predecir los productos finales de interés en base a las condiciones de trabajo de la columna. La simulación de la unidad se la desarrolla en el programa de código abierto DWSIM, planteándose identificar las variables que intervengan considerablemente en el proceso y en los productos requeridos mediante un análisis de sensibilidad del proceso y usando así estas variables como datos de entrada en el diseño de la RNA y las composiciones de los productos finales como la salida.

Las RNA han tomado mayor impacto en la ingeniería química por su aplicación permitiendo así al Ingeniero predecir el comportamiento ya sea desde un equipo o un proceso químico siendo entonces esta la razón por la cual es de gran ayuda a una escala industrial. Para el trabajo de Titulación presentado se diseñará una RNA con una base de datos obtenidas en el programa de simulación. Los datos serán se ingresarán en la aplicación Neural Net Fitting de MATLAB con el objetivo de diseñar, adiestrar, testear y validar la red con el menor error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de regresión (R) que se aproxime más a la unidad después del entrenamiento. Los resultados como son predicciones se deben validar mediante un análisis estadístico comparativo para evaluar la capacidad de predicción de la red siendo entonces el análisis ANOVA el indicado, la finalidad es de determinar el nivel de confianza de los resultados predichos para una utilización posterior en la optimización de la Unidad de Destilación de Crudo (CDU).

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

El crudo o lo que denominaremos cómo petróleo es una sustancia compleja compuesta por una combinación de átomos de hidrocarburos (nos referimos a conjuntos de átomos compuestos por carbón e hidrógeno tanto en cortas como largas cadenas). El petróleo resulta de origen natural ya que se forma a partir de pequeñas plantas marítimas y animales que han muerto y han estado enterrados en fondo oceánicos por muchísimo tiempo, específicamente entre 300 a 400 millones de años. (Altawell 2021). El petróleo toma mayor importancia cuando resulta ser el reemplazo del carbón para el funcionamiento de maquinaria en la revolución industrial en el año 1800 (Fagan 1991).

Con el pasar del tiempo estos organismos enterrados con la ayuda de la presión y el calor a los que se someten y siendo esta materia orgánica se descomponen dando como resultados depósitos de petróleo y gas que se incrustan en la roca madre (Altawell 2021). Al momento de la extracción del petróleo no solo obtendremos este, sino que también estará acompañado por gas natural. Se le da el nombre de crudo al petróleo ya que no está refinado y es aquí donde la refinería cumple una función muy importante ya que al realizar este proceso se obtienen otros productos a partir del crudo (gasolina, queroseno, diésel, entre otros) los cuales poseen mayor valor que el crudo como tal y al gas natural se le da un tratamiento y se denomina gas licuado de petróleo (Fagan 1991).

La importancia que esta sustancia tiene en la sociedad de hoy en día es inmensa, podemos resumirlo que en la industria significa potencia y energía. Este proporciona a las máquinas potencia mecánica e incluso poder política ya que las industrias junto con los países dependen del proveedor y precio de este combustible siendo así el petróleo por hoy en día nuestra principal fuente de energía (Fagan 1991).

El negocio de la refinación consiste en tomar grandes volúmenes de crudo para transformarlos en productos que se les da diferentes usos y con mayor valor. A diferencia de la industria de petróleo y gas natural que tiene una ganancia por venta de esta materia prima, la industria de refinería obtiene un beneficio por la venta de cada barril con petróleo procesado o refinado (Clews 2016).

El proceso al que se somete el crudo es de alquilación, reformado, isomerización, hidrocrqueo, entre otros. El Ecuador posee la industria de extracción y refinería de petróleo donde se involucran estos procesos, siendo así el #31 en producción (500 000 barriles) y #20 en reserva (6.5 billones de barriles) a nivel mundial.

1.2. Planteamiento del problema

El petróleo o lo que llamaremos crudo es un compuesto químico el cual lo componen partes sólidas, líquidas y gaseosas. Por una parte, el crudo está compuesto por compuestos que reciben el nombre de “hidrocarburos” los cuales tienen átomos de carbono e hidrógeno y por otra parte se encuentra nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales en pequeñas cantidades. El crudo se lo encuentra de forma natural en depósitos de roca sedimentada y en lugares donde en algún momento hubo mar ((AOP) 2002). El petróleo es indispensable para la sociedad ya que resulta ser la materia prima para el funcionamiento de los vehículos, genera electricidad siendo así el energético más importante en la historia de la humanidad, recurso natural no renovable el cual aporta gran cantidad de energía y el mundo la usa (Mariño Peacock, Labrada Vázquez, Sánchez del Campo Lafita 2016), e incluso se lo involucra para la producción de plástico, sin embargo no se puede usar como crudo que es lo que se obtiene de los yacimientos ya que no tiene valor por la razón de que no presenta gran uso directamente y es por eso que se refina este crudo para de este sacar provecho con diferentes productos los cuales tienen mucho más valor (Watkins 1979). La industria del petróleo es la encargada del proceso de refinación del crudo ya que en sí carece de aplicaciones industriales, para darle un mayor valor a los diferentes productos con características que presentan interés comercial siendo así estos usados como base para varias industrias (Pino 2014). La refinación del crudo resulta fundamental en el suministro del petróleo, del pozo a la bomba y de aquí en adelante son valores agregados como por ejemplo transporte del pozo a la refinería y esta industria es encargada de la conversión la cual se propone en hacerlo maximizando la conversión con el mayor aprovechamiento de la planta y el menor gasto económico ((icct) 2011). La unidad de destilación de crudo (CDU) es la encargada de la refinación del petróleo en primera estancia y es en la que nos enfocaremos en este estudio, siendo esta la que se encuentra como base en cualquier refinería y tiene como objetivo el obtener del petróleo diferentes productos mediante diferentes rangos de ebullición (Barahona Alvear et al. 2018). Es importante el operar esta unidad con condiciones óptimas ya que de esta manera se obtiene un buen rendimiento y se maximiza la obtención de los productos

(Mariño Peacock, Labrada Vázquez, Sánchez del Campo Lafita 2016) cualquier cambio en esta unidad tiene consecuencias en la calidad de los productos.

En base a lo explicado, este estudio propone la simulación de este proceso específicamente en una unidad de destilación de crudo (CDU) usando el software DWSIM. La finalidad de esta simulación es generar una base de datos para emplear una Red Neuronal Artificial (RNA) usando el programa Matlab y así poder predecir condiciones óptimas de esta unidad respecto a un crudo latinoamericano.

1.3. Justificación

Hoy en día el petróleo es uno de los recursos más demandados en todo el mundo sin tener en cuenta los productos derivados que se pueden obtener de este, es así que resulta de gran importancia el tratamiento óptimo de este para su mayor aprovechamiento económico. Esto se logra conociendo las condiciones óptimas de la unidad de destilación de crudo (CDU) lo cual se puede obtener mediante un gran número de ensayos de campo para acertar con los valores adecuados en cada una de las variables. Como solución se propone el simular este proceso mediante un simulador comercial de código abierto como es DWSIM el cuál ahorra una considerable cantidad de dinero en los ensayos ya que tendremos la oportunidad de simular el proceso y como validación creemos pertinente el compararlo con resultados de valores obtenidos en artículos científicos de alto impacto que hacen uso de simuladores como Aspen Hysys o Aspen Plus.

La utilización de simuladores hoy en día es una herramienta que se usa en la industria ya sea para tener un mejor conocimiento del proceso mediante las variables críticas y así usando estas para la optimización. Los paquetes de simulación son frecuentemente usados en la industria petrolera dándole la oportunidad de construir una planta virtual y así ahorrando dinero, tiempo y el medio ambiente.

Una de las razones para este estudio es que en hay mucha bibliografía donde se hace uso de crudos árabes u otros que se consideran livianos (acorde al número API) mientras que no se encuentra información para crudos medianos o livianos que sean latinoamericanos. DWSIM es un software gratuito usado para simulación de procesos industriales los cuales pueden incluir procesos químicos y entre otros, usado como herramienta para analizar el comportamiento de las variables en un proceso, estudios de sensibilidad y partiendo de esto para optimizar procesos, ya sea en energía, dinero, maximizar la cantidad de producto y su calidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Simular en DWSIM una unidad de destilación de crudo (CDU) realizado en Aspen HYSYS junto con el uso de redes neuronales artificiales.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las variables, parámetros y las operaciones necesarias para la simulación del proceso.
- Validar la simulación de la unidad de destilación de crudo por medio de comparación de los resultados con referencias bibliográficas de alto impacto.
- Implementar redes neuronales artificiales como soporte de la unidad de destilación para la predicción de los principales productos de destilado.
- Realizar un análisis estadístico para la evaluación de la capacidad de predicción de la red neuronal en base a valores reales y los predichos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

2.1.1. *Simulación del proceso de destilación de crudo*

Los programas que permiten la simulación de cualquier proceso químico se han convertido en una herramienta importante y ya es usada en industrias con procesos que requieren una gran inversión de capital, esto con el objetivo de ahorrar pérdidas tanto de energía como de tiempo que esto significa dinero.

2.1.1.1. *Simulaciones Rigurosas en la destilación de crudo*

Pannocchia et al., (2006) expone la implementación de un controlador predictivo multivariable de uso común en el ámbito comercial, aplicado a un proceso simulado de destilación de crudo con gran precisión. Después de detallar las características principales tanto del proceso como del controlador, se ilustra la forma en que es posible establecer una conexión entre los dos ambientes de simulación y control. Se muestran diversos resultados de simulación que exhiben los cambios característicos en la calidad del producto y las transiciones entre diferentes tipos de crudo. El propósito fundamental del artículo es evidenciar cómo los simuladores dinámicos meticulosos pueden ser empleados con eficacia para disminuir los costos en proyectos de Control de Procesos Avanzado, al reducir las etapas de identificación del modelo, diseño del controlador y puesta en marcha. En otro artículo se realiza una simulación dinámica exhaustiva con el propósito de determinar las condiciones de operación óptimas de una unidad de destilación de crudo que cuenta con 56 bandejas y una capacidad de 65,000 barriles por día. En este proceso Chang et al., (1998) formula un modelo que no solamente abarca ecuaciones de balance de masa y energía, sino que también incorpora ecuaciones no lineales diseñadas para capturar el comportamiento de los fluidos en la columna, como la carga del desagüe, el fenómeno de inundación del jet, la limitación de velocidad en los orificios y la posibilidad de obstrucción en los desagües. Finalmente, se obtiene una comprensión integral del comportamiento dinámico de la unidad tanto en el encendido o arranque y en el apagado. La simulación de los procesos existentes de destilación de petróleo crudo se caracteriza por su complejidad y dificultad debido a la naturaleza de las interacciones involucradas, que abarcan elementos como materias primas variables, procesos altamente integrados,

entre otros en base al fraccionamiento de este. Gadalla et al., (2015) introduce un algoritmo sistemático basado en la simulación, diseñado para modernizar una columna de destilación de crudo ya en funcionamiento. La simulación aborda a la unidad de destilación junto con la red de intercambiadores de calor. El proceso propuesto se pone en práctica para simular una unidad de destilación de crudo existente, la cual procesa un flujo de 100,000 barriles por día de petróleo crudo de origen árabe. Los resultados encajan de manera satisfactoria con los datos reales. Posteriormente, el modelo se utiliza para proyectos de optimización y modernización con el propósito de minimizar el consumo de energía y la emisión de dióxido de carbono (CO₂) en la refinería.

2.1.1.2. Diseño de controladores en base a simulaciones

En el transcurso de estos últimos años junto con el progreso tecnológico se ha observado un incremento en el interés por los procesos petroquímicos, particularmente en el ámbito de la refinación. No obstante, la considerable variabilidad en las características dinámicas que se presentan en la columna de destilación atmosférica plantea un reto a la hora de obtener productos de alta calidad. Se persigue un objetivo el cual es obtener un producto de alta calidad sin importar las variaciones de composición del crudo de entrada, Sotelo et al., (2017) explica a detalle un nuevo diseño de estrategia de control en una instalación convencional de destilación de crudo. La dinámica del proceso y su control se someten a simulación en un entorno dinámico utilizando Aspen HYSYS, y esto se lleva a cabo bajo condiciones operativas reales.

En base a lo mencionado de simulación e implementación, Raimondi et al., (2015) presenta en detalle el diseño de una estrategia de control adaptativo predictivo (AP) para un proceso de destilación atmosférica. La propuesta se origina en el alto consumo energético y las rigurosas especificaciones de productividad siendo así el control automático una alternativa para este desafío. La estrategia hace uso de controladores AP para abordar la dinámica del proceso, que es no lineal y variable en el tiempo. Para simular la estrategia de control AP, se emplean entornos de simulación como ADEX y MATLAB. La dinámica del proceso se replica en un modelo dinámico de Aspen. La evaluación del rendimiento del controlador se lleva a cabo en un simulador que representa un proceso de destilación atmosférica de petróleo crudo, operativo en una refinería de PEMEX. Para completar la propuesta, se comparan los resultados de la simulación con una estrategia de control que se basó en PID teniendo como resultado una mejora en la estabilidad operativa.

2.1.1.3. *Reacondicionamiento con uso de simuladores*

Yan et al., (2019) efectúa el reacondicionamiento o modernización y optimización integral de una unidad de destilación de petróleo crudo (CDU) basándose en el análisis ya establecido de la pérdida de exergía. El propósito subyacente de este análisis es elevar la eficiencia en el uso de energía en el proceso, tanto desde una perspectiva cualitativa como cuantitativa. La derivación teórica se realiza en relación con la pérdida de exergía de las unidades importantes en la CDU, incluyendo los condensadores, los hornos y las columnas de destilación. Finalmente, al realizar una comparación con el proceso inicial, la eficiencia exergética del proceso mejorado se incrementa del 28.9% al 41.4%, y el consumo anual total (TAC, por sus siglas en inglés) se reduce en un 28.7%, manteniendo los caudales y las calidades de cada producto constantes.

Enríquez-Gutiérrez et al., (2015) propone una metodología de modernización sistemática en base a la simulación de columnas de destilación y redes de intercambiadores de calor (HEN). Se emplean correlaciones hidráulicas para evaluar la viabilidad de sustituir las partes internas de las columnas de destilación por bandejas de mayor capacidad y/o empaques estructurados. En estos proyectos de modernización, el enfoque es hacer uso del mayor número posible en capacidad de las unidades existentes mediante ajustes en los parámetros operativos y/o la modificación de los equipos siendo así mayormente para aumentar la recuperación de calor, incrementar el caudal de crudo y/o elevar fracciones de los productos más valioso. Como resultado se ilustran con esto y otros estudios los beneficios de la metodología propuesta al analizar y evaluar las posibles modificaciones en los equipos durante la modernización de sistemas de destilación, particularmente cuando se busca aumentar la capacidad.

Con base a este estudio, abordamos un tema bastante importante y una de las razones por las cuales se realizan simulaciones de los procesos químicos siendo así la optimización donde M. Gadalla et al., (2013) presenta una metodología innovadora basada en una simulación rigurosa y un marco de optimización que abordan de manera conjunta la columna de destilación e intercambiadores de calor, basándose en que estos procesos son altamente demandantes en términos de energía; se ha calculado que la cantidad de energía necesaria para estas plantas equivale al 2% del petróleo crudo total procesado. Dicha metodología contempla modificaciones en el proceso y en la estructura, junto con las interacciones entre el proceso de destilación preexistente y el sistema de recuperación de calor. El nuevo enfoque incorpora múltiples objetivos, tales como la reducción del consumo energético, la disminución de las emisiones, el aumento de la capacidad y la

mejora de las ganancias. Se ha tomado en cuenta una planta atmosférica real de MIDOR, una refinería egipcia, para poner en práctica este mecanismo ya propuesto. Como resultado, se han obtenido diversas soluciones de modernización que abarcan desde la ausencia de modificaciones hasta la incorporación de áreas adicionales en los intercambiadores de calor y la inclusión de unidades o equipos suplementarios. Tengamos en cuenta que es más habitual el reacondicionar un equipo que construir uno nuevo.

2.1.1.4. Optimización del proceso de destilación de crudo

En una investigación usando una unidad de destilación de petróleo (CDU) ya existente, Waheed & Oni, (2015) encontró una oportunidad para optimizar su desempeño en base a las eficiencias energéticas y exergéticas de la instalación que son limitadas. La metodología adoptada con el propósito de optimizar la operación de la planta emplea técnicas de simulación de procesos y métodos de modernización tanto exergética como tradicional, con el objetivo de demostrar qué es capaz de lograr el proceso con una inversión de capital requerida considerable. Los ajustes realizados en el proceso condujeron a un aumento del 4.0% en la eficiencia energética total de la CDU y un 1.6% en la eficiencia exergética, así como una disminución del 14.2% en las emisiones y un ahorro de \$1.61 millones anuales en la factura de servicios públicos. La inversión de capital necesaria para llevar a cabo el reacondicionamiento ascendió a \$3.78 millones, con un tiempo estimado a recuperar la inversión de 2.35 años. Algo importante a agregar es que la optimización da como resultado ahorro de energía lo cual significa dinero.

Si se desean mejores resultados en la optimización, es necesario la aplicación simultánea tanto el proceso de destilación como la red de intercambiadores de calor. A pesar de que esta premisa parece sencilla en principio, existen numerosas dificultades asociadas. Por otra parte, el modelo para el proceso de destilación que se va a acoplar con el modelo de los intercambiadores de calor unidos debe ser lo suficientemente sencillo y completo como para integrarse a una correcta optimización. Ochoa-Estopier et al., (2014) examina distintos puntos de vista para el modelado de destilación de petróleo crudo y destaca las áreas de aplicación de estas diversas aproximaciones. Además, se proporciona un ejemplo en el cual se aprecia el rendimiento computacional de modelos de destilación de petróleo crudo tanto reducidos como rigurosos. Uno de los desafíos más significativos para la correcta aplicación de este enfoque es generar modelos de destilación simplificados de manera efectiva. Una de las alternativas para la aplicación de un modelo abreviado resulta ser las redes neuronales artificiales.

Los cambios en las propiedades del crudo que se suministra a una CDU, específicamente atmosférica, pueden tener un impacto en la calidad de los productos resultantes. Además, es importante manejar de manera eficaz las alteraciones en el flujo del crudo. En base a estas premisas, Ahmadian Behrooz, (2019) implementó una estructura de control inferencial que se basa en un análisis de la Matriz de Ganancia Relativa (RGA) y que permite el control de varias temperaturas en las bandejas del proceso. Posteriormente, se ha realizado una optimización estocástica (elemento aleatorio) en un lazo cerrado con el objetivo de lograr un control más preciso. Los resultados de las simulaciones en el lazo cerrado indican un mejor rendimiento en términos de la capacidad de los controladores para rechazar perturbaciones tanto en el flujo como en la calidad del crudo de alimentación.

Ibrahim et al., (2018) introduce un enfoque de optimización innovador unidades de destilación de petróleo crudo con integración térmica y en base de resultados de simulaciones, las cuales son ampliamente empleadas en las refinerías. La metodología presentada combina diversos elementos en un marco unificado: modelos aproximados de columnas de destilación basados en redes neuronales artificiales, restricciones de viabilidad creadas mediante una máquina de soporte vectorial y análisis de pinch para maximizar la recuperación de calor. Todo esto con el objetivo de optimizar tanto la configuración de la columna de destilación como sus condiciones operativas. Los modelos de columna aproximados se basan en la estructura y condiciones operativas de la columna, generando resultados relacionados con su desempeño. La máquina de soporte vectorial actúa como un filtro, descartando alternativas de diseño inviables y reduciendo el tiempo de cálculo, lo que en última instancia mejora la calidad de la solución final. Este enfoque podría ser de gran utilidad para los ingenieros al diseñar y operar refinerías de petróleo de manera óptima, considerando que se prevé que estas sigan siendo un componente crucial en la combinación energética durante varios años.

2.1.1.4.1. Ahorro energético en el proceso de destilación de crudo

Nalinakshan et al., (2019) ha dirigido su atención hacia el ahorro energético en una CDU a nivel industrial. Se propuso y simuló en Aspen HYSYS una alternativa al modelo usado normalmente en la destilación de petróleo crudo en la Refinería Kochi de Bharat Petroleum Corporation. En base a lo esperado teóricamente y los resultados obtenidos a través de simulaciones indicaron que la destilación progresiva del petróleo crudo disminuye la carga de servicios públicos y aumenta la extracción de componentes ligeros

de mayor valor. La optimización se lleva a cabo de manera sencilla en lugar del método matemático convencional, en conjunto con herramientas avanzadas de control de procesos, lo que resulta en una operación rentable en tiempo real.

Una situación típica es la de las plantas de refinación de petróleo, donde se da un uso intensivo de energía y existe un potencial prometedor para aplicar soluciones que ahorren energía. Errico et al., (2009) evaluó la viabilidad de modificar las condiciones de alimentación a través de la instalación de un tambor de preflash o una columna de preflash plate en una unidad de destilación de crudo. Se recolectaron datos reales de la planta para lograr una simulación precisa de la unidad mediante el software Aspen Plus. Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos de la planta en términos de caudal y calidad del producto, utilizando las curvas ASTM D-86, lo que resultó en un acuerdo satisfactorio. Dado que el horno constituye un cuello de botella en la planta, la incorporación de ambos dispositivos de preflash permite reducir el consumo energético del horno. Sin embargo, esta reducción de energía está vinculada a la disminución de un tipo específico de destilados (ya sean ligeros o intermedios). La elección del dispositivo de preflash más adecuado se basó en el rendimiento productivo de la planta.

Como mencionamos anteriormente, la selección del tambor preflash dependerá de la planta, por ende Al-Mayyahi et al., (2014) analiza los efectos del empleo de distintos diseños de pre-destilación o preflash en relación con la eficiencia energética y a las emisiones relacionadas al CO₂ de la CDU. La pre-destilación del crudo emerge como una técnica prometedora para disminuir los requisitos de energía térmica de la CDU. Sin embargo, esta estrategia podría tener impactos en la producción del producto y/o en el rendimiento general.

Waheed et al., (2014) evaluó una unidad de destilación de crudo (CDU) en una planta de refinería en Nigeria teniendo una unidad de destilación atmosférica (ADU), la unidad de destilación al vacío (VDU), la unidad de pre-destilación (PFU), la unidad de separación (SPU), la unidad de estabilización (SBU) y la red de intercambiadores de calor (HEN). Mediante el uso de datos reales de la planta, se llevó a cabo una simulación de la CDU utilizando el software Aspen HYSYS y se realizaron análisis energéticos en base a dinero. Los componentes más ineficientes resultaron ser los hornos, responsables del 51.6% de las pérdidas totales de exergía. El análisis ambiental y económico también destacó que estos componentes tienen un gran potencial de mejora. La optimización de las refinerías debe centrarse en alcanzar las máximas eficiencias técnicas posibles, a pesar de la

inversión significativa que esto pueda requerir. No se trata solo de reemplazar componentes dañados para lograr una utilización completa de la capacidad.

2.1.2. Redes neuronales artificiales en diferentes procesos de destilación

2.1.2.1. Destilación y redes neuronales

Como introducción para esta investigación resulta relevante el conocer como una red neuronal ayuda a aprender el diseño de controles y la configuración de estos para una columna de destilación. Se han presentado artículos donde se muestra un sistema experto en este tema, sin embargo, la extracción del conocimiento de este sistema fue la parte más difícil y que se usó más tiempo para el desarrollo del sistema. El propósito del aprender sobre este tema es evitar estas dificultades presentadas y más que nada la adquisición de conocimiento (Birky, McAvoy 1990).

Sabemos entonces que las redes neuronales solucionan problemas respecto a datos y procesamiento, ahora pensemos en la optimización de la destilación y esto se realizaría incluso menorando la potencia computacional. Esta optimización se propuso con el uso de redes neuronales artificiales (ANN). Para validar esta aplicación Greaves et al., (2003) realizó en una columna por lotes de recipiente medio (MVBC) en una planta piloto. La idea fue que en base al producto optimizar los parámetros de operación de columna como fueron reflujo, tiempo de lote. Este artículo demostró que un ANN puede reproducir la dinámica real de la planta con buena precisión y que se puede optimizar sin necesidad de esfuerzo computacional.

Respecto al producto, sabemos que industrialmente resulta un problema la calidad de este ya que no podemos medirla de forma rápida y que sea fiable. Luo et al., (1995) propone que la solución es el control inferencial donde para las cuales salidas no medibles se infieren con mediciones secundarias y controlar estas salidas. Este artículo propone un estimador inferencial basado en Fuzzy-Neural-Net (FNN), esta está construida por varias redes distribuidas donde su clasificación, ejecución y aprendizaje se rige la teoría de conjuntos difusos. Esta aplicación demostró ser superior a un control convencional, mejorando la pureza de la columna de destilación.

De forma específica, Sharma & Singh, (2012) presenta un ejemplo con el terc-amil metil éter (TAME) el cual presenta un comportamiento altamente no lineal y es lo que se propone en su trabajo, un modelo de control predictivo (MPC) con uso de redes neuronales para controlar estos procesos no lineales. Para esto se usó control PID

convencional, modelo de control predictivo y control predictivo de red neuronal (NNPC). Se realizó una comparación y se concluyó que NNPC y MPC tienen mejor rendimiento de control y más suave que el PID, en este caso para el cambio de punto de ajuste y para el cambio de carga de $\pm 10\%$ en el caudal de alimentación.

Savkovic-Stevanovic, (1996) propone en su trabajo que se puede hacer la aplicación de una red neuronal inversa para el control de la composición de los productos en una columna de destilación. Esta red neuronal se basa en el algoritmo de retropropagación de la regla delta generalizada lo cual minimiza a la red la suma de cuadrados del residual. Los resultados que se obtuvieron demuestran la viabilidad del uso de redes neuronales para modelos dinámicos no lineales a partir de datos de entrada-salida de la planta.

Como sabemos, en la industria como ya lo mencionamos es un problema la operación óptima de una unidad de destilación en nuestro caso de manera que se obtengan buenos resultados con rendimiento y producción variable. Li et al., (2022) propone una solución la cual es una estrategia de optimización (OSS) junto con modelado de redes neuronales integradas en mecanismos (MENN). Se asegura que MENN podrá reflejar con precisión las características del proceso. Partiendo de estos se realizaron optimizaciones para la temperatura superior de la columna asegurando así productos calificados. Se realizaron pruebas a nivel industrial las cuales mostraron buena adaptación a diferentes rendimientos de producción, esto mejoró la tasa de calificación del producto

2.1.2.2. Destilación por membrana

Khayet & Cojocar, (2013) al ver que obtuvieron buenos resultados respecto al usar redes neuronales para modelar y predecir el proceso de destilación de membrana de espacio de aire, en otro trabajo aplica ANN a un proceso de destilación de membrana, pero ahora por el método de gas de barrido (SGMD), usando las ANN para la predicción del índice de rendimiento basándose en 53 pruebas SGMD experimentales diferentes. El punto óptimo fue determinado por el método Monte Carlo obteniendo así las condiciones óptimas para la temperatura de alimentación de $69\text{ }^{\circ}\text{C}$, caudal de aire de 34.5 L/min y un caudal de alimentación de 160 L/h . Se recalca que se obtuvo experimentalmente un índice de desempeño de $1.493 \times 10^{-3}\text{ kg/m}^2$ siendo este valor el máximo obtenido en la parte experimental.

Una aplicación interesante de la destilación de membrana para la desalinización es con el uso de energías renovables, el problema radica en el control y la optimización ya que se opera de manera discontinua y no estacionariamente. Porrazzo et al., (2013) propone la

implementación de una red neuronal, entrenándola con datos experimentales deliberados, posterior se analizó el rendimiento del proceso en diversas condiciones operativas para poder saber respecto a la producción del destilado el caudal de alimentación, radiación solar y temperatura de alimentación en frío. Se concluyó que la red neuronal cumple su función en condiciones operativas variables.

2.1.2.3. *Destilación al vacío*

Para la producción de aceite base para lubricantes es usada esta operación de destilación al vacío y es importante su control para cumplir con el control de calidad en el producto final. El modelo matemático VDU es uno de los más usados para el control de las variables de esta operación, sin embargo, la problemática está en la falta de conocimiento y limitada capacidad de obtener datos. Se ha pensado en desarrollar sensores y controladores inferenciales hay características complejas. Yoon et al., (2022) da una solución y es la de desarrollar una RNN apilada con longitud de secuencia para predecir la viscosidad cinemática. Estos predictores de calidad se aplican para desarrollar un optimizador en tiempo real para ajustar las variables operativas clave para nuestro producto. Se propone continuar con este estudio desarrollando los sensores y controladores que ya mencionamos.

Retomando la desalinización, se aplica un ANN en el proceso de destilación de membrana al vacío para describir y evaluar el desempeño donde las variables de entrada son presión de vacío, temperatura de entrada de alimentación, concentración de la solución acuosa de sal de alimentación y caudal de alimentación y en la respuesta el flujo de permeado. Como resultado la ANN es capaz de modelar este proceso y se optimizó con la aplicación de algoritmos genéticos (Tavakolmoghadam, Safavi 2012).

2.1.2.4. *Destilación de crudo*

Como introducción a la destilación de crudo se busca identificar el alimento y producto, esto se hace en base a un sensor y Lee et al., (2001) en su trabajo propone el control de este por medio de redes neuronales. Aparte que se usan métodos de preprocesamiento y post procesamiento de datos para mejorar la visibilidad del modelo del sensor de software. Se demostró la eficacia del sensor basado en redes neuronales.

Ochoa-Estopier et al., (2013) aplica redes neuronales artificiales a una columna de destilación de crudo con calor integrado con el fin de optimizar el valor neto de los productos, dando un mayor rendimiento a productos de mayor valor. La columna de

destilación junto con una red de intercambiadores de calor se asocia a un marco de optimización para determinar las condiciones operativas teniendo en cuenta el mejorar la economía del proceso, aquí se analiza la factibilidad de la destilación, recuperación del calor, restricciones de energía y equipos.

Shi et al., (2017) aplica wave-nets que son redes neuronales mejoradas (WNN) junto con un algoritmo de competencia de alineación (LCA) el cual le permitió modelar la unidad de destilación de crudo (CDU). El objetivo de este trabajo fue la optimización económica del proceso. Como resultado se valida mediante una comparación con la operación base, teniendo así incrementos en queroseno y diésel de hasta 20% solo aumentando menos del 5% de las funciones de los enfriadores intermedios, demostrando la eficacia de WNN en este proceso.

Como una aplicación más completa respecto a las redes neuronales y la destilación de crudo, Liau et al., (2004) desarrolló un sistema experto con redes neuronales (ANN) donde se optimizó el proceso y maximizando la tasa de producción de petróleo respecto a las calidades requeridas. Este sistema fue posible gracias a datos de un sistema operativo CDU proporcionado por ingenieros, teniendo así las variables de entrada de propiedades del crudo y variables manipulables, mientras que en la salida fue la calidad del petróleo. En el trabajo se predijo la calidad del petróleo en función a las variables de entrada. Este sistema fue capaz de proporcionar información operativa en línea del proceso CDU a los operadores respecto al cambio de propiedades del crudo. Para complementar esta aplicación, Motlaghi et al., (2008) desarrolló un sistema experto donde aplicó un modelo de redes neuronales (NMM) y su objetivo fue el predecir flujo de producto requerido y temperatura en las características de alimentación de entrada requerida. Este sistema fue diseñado también para optimizar error en la salida del modelo y maximizar la tasa de producción de petróleo. Este sistema se basó en datos de una refinería en funcionamiento. Al igual que el trabajo de Liau et al., (2004), Motlaghi et al., (2008) se basó en variables de entrada como caudal y temperatura y en la salida específicamente en la calidad del petróleo. Lo adicional en este trabajo fue la implementación de algoritmos genéticos (GA) con el objetivo de minimizar el error del sistema experto y maximizar la tasa de producto a nivel industrial.

2.2. Referencias Teóricas

2.2.1. Composición del crudo

Proveniente de rocas dentro de la tierra, de aquí su nombre en latín “*petroleum*” a la cuál denominamos aceite de piedra. Su composición está dada por hidrocarburos los cuáles se componen por átomos de hidrógeno y carbono. Estos hidrocarburos combinados tienen múltiples usos formando así varios compuestos como por ejemplo sólidos que entre sus aplicaciones está el asfalto, líquidos que los encontramos en el petróleo líquido y de forma gaseosa como el gas natural (mezcla de hidrocarburos que a temperatura y presión ambiente son gaseosos) (Fagan 1991).

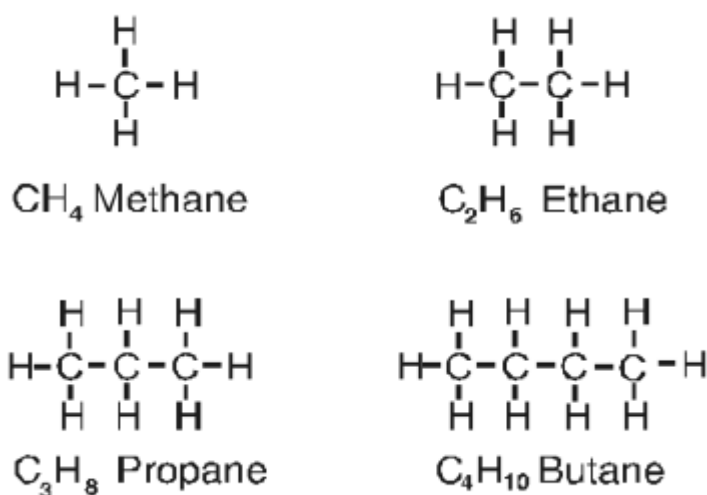


Ilustración 2-1: Moléculas de Hidrocarburos

Fuente: (Fagan 1991)

Las moléculas mostradas en la ilustración 2-1 son hidrocarburos que se encuentran en forma gaseosa en condiciones normales. El Gas Natural contiene una mezcla de estos hidrocarburos e incluso algunas impurezas (nitrógeno, azufre, oxígeno, mercaptanos, dióxido de azufre y ácido sulfhídrico) (Fagan 1991). Entre los compuestos químicos representativos tenemos: Alifáticos, Aromáticos, Hidrocarburos Parafínicos, Hidrocarburos Nafténicos e Hidrocarburos Asfálticos (Marigómez 2014).

Los hidrocarburos con mayor número de carbonos en su composición representan un petróleo más pesado, por ende, está líquido y se lo encuentra viscoso con una textura similar al aceite y los denominamos sólidos cerosos (Fagan 1991). Las propiedades de los compuestos de hidrocarburos están determinadas por la cantidad de átomos de hidrógeno y carbono, el carbono es la guía ya que es el átomo con mayor peso molecular

en los hidrocarburos, decimos así que mientras más carbonos tenga el compuesto más pesado será.

Tenemos así 4 tipos de crudo basados en su densidad y toxicidad:

- Light Distillates
- Middle Distillates
- Medium Distillates
- Heavy Fuel Oil (combustible de aceite pesado) (Shotonwa, Giwa-Ajeniya, Mekuleyi 2018).

2.2.2. *Productos de Refinación*

En base al crudo que tenemos y sus características de acuerdo con el número de carbonos que posea tendremos nuestros productos de refinación, recordemos que el objetivo de la refinación es el fraccionamiento y separación de las cadenas de hidrocarburos con ayuda de diferentes temperaturas en base a los puntos de ebullición de los compuestos que deseamos obtener los cuales son productos comerciales ya que el crudo como tal no tiene tanto valor como sus derivados.

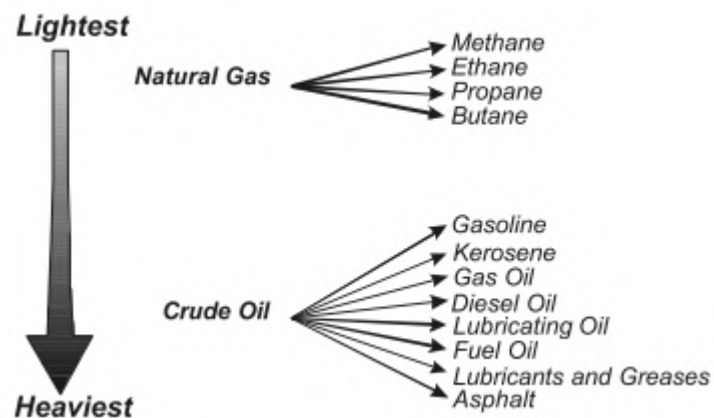


Ilustración 2-2: Petróleo y algunos de sus componentes derivados

Fuente: (Fagan 1991)

Como observamos en la ilustración 2-2, va desde un crudo liviano hasta el más pesado y en base a esto tendremos los productos de refinación que un posterior tratamiento por parte de la petroquímica tendrán otros usos, pero los presentados son de nuestro interés como los gases de refinería (metano, etano, propano y butano), gasolinas, nafta, keroseno, gasóleo y entre otros y cada uno con su cadena de hidrocarburos respectiva.

En la siguiente figura se tenemos las fracciones que se obtienen de la destilación del crudo desde las fracciones más livianas hasta las más pesadas, esto lo podemos observar en el

apartado del rango de temperatura de ebullición (Boiling point range) ya que dependerá del número de carbonos presentes en su composición teniendo así al gas natural de 0 a 30 °C, es decir hasta temperatura ambiente o condiciones normales y así encontraremos para cada fracción la temperatura en la que será posible su ebullición para su respectiva separación. Como habíamos mencionado, la temperatura de ebullición dependerá del número de carbonos presentes y esto se ve reflejado en el siguiente apartado que nos indica el número de átomos de carbonos por molécula (Number of carbon atoms per molecule) teniendo una relación directa donde mayor número de átomos de carbono será mayor la temperatura de ebullición y se considerará una fracción más pesada. En el último apartado de esta figura se expone los principales usos (Major uses) que se le da a cada una de estas fracciones teniendo así como resumen: Gas natural (combustible), éter de petróleo (solvente en la industria farmacéutica), nafta cruda (solvente), gasoline of petrol (combustible para combustión interna en motores de carros), petrol (combustible para combustión interna en motores de motocicletas y botes), ligroin (solvente de laboratorio), fuel (combustible para automóviles), benzene (pinturas), kerosene (combustible para motores de reacción) y entre otras fracciones más pesadas. En la ilustración 2-3 se puede observar a detalle la fracción, rango de temperatura de ebullición, número de átomos de carbono y los principales usos que se le da antes de que pase a la industria petroquímica.

Primary petroleum fractions	Boiling point range (°C)	Number of carbon atoms per molecule	Major uses
Natural gas	0–30	C ₁ –C ₄	Fuel and the synthesis of raw materials for chemical industries
Petroleum ether	20–90	C ₅ –C ₇	Solvent used majorly in pharmaceutical industries and as inhalant drug
Crude naphtha	30–150	C ₅ –C ₁₄	Solvents, cleaning fluids, paints and varnishes
Gasoline of petrol	70–90	C ₆ –C ₁₈	Fuel for internal combustion engines in cars and bikes; Solvent for dry-cleaning
Petrol	70–200	C ₆ –C ₁₀	Fuel for internal combustion engines in motorbikes and boats
Ligroin	90–120	C ₇ –C ₈	Solvent in dry-cleaning and as a laboratory solvent
Fuel	100–200	C ₅ –C ₁₀	Fuel for automobiles and power-generating plants
Benzene	120–160	C ₅ –C ₁₀	Solvents for dry-cleaning and also utilized in the paint and oil industries
Kerosene	150–300	C ₁₀ –C ₁₈ C ₁₀ –C ₃₈	Fuel for Jet engines, central heating systems, lamps and stoves, manufacturing oil gas
Gas oil	>275	C ₁₂ –C ₂₀	Fuel for diesel engines
Heavy oil	>300	C ₁₈ –C ₃₈	Fuel for marine engines
Diesel oil	300–400	C ₁₅ –C ₂₅	Fuel for locomotives
Lubricating oil	300–400	C ₂₀ –C ₂₄	Lubricant and manufacture of shoe polishes and candles
Paraffin wax	>400	C ₂₁ –C ₃₀	Electrical insulators and lubricants
Lubricating oil, waxes	Nonvolatile oil	>C ₂₀	Lubricant candles
Asphalt and bitumen	Solid residue	>C ₄₀	Road surfaces and roofing
Pitch			Toilet goods and ointments
Coke			As fuel and as paints and varnishes

C₁–C₄ are gases, C₅–C₁₀ are mostly liquids, while the rest are solids and viscous liquids, which can be classified as semisolids from a physical state viewpoint.

Ilustración 2-3: Fracciones primarias obtenidas de la destilación del crudo junto con sus propiedades y usos

Fuente: (Shotonwa, Giwa-Ajeniya, Mekuleyi 2018)

2.2.3. DWSIM

Simulador para procesos químicos que empezó como un proyecto en Excel en el año 2004 donde Daniel Wagner Oliveira de Medeiros (desarrollador) empezó con un algoritmo básico flash hasta la implementación de un diseñador de diagramas de flujo de proceso creando así al programa como tal para uso académico por estudiantes y profesores e incluso para investigaciones de procesos importantes en la industria (DWSIM - The Open Source Chemical Process Simulator 2023). DWSIM es un simulador de código abierto que es operado en estado estacionario modular secuencial y es compatible con CAPE-

OPEN y puede ser utilizado en sistemas operativos como Windows, Linux, Android, macOS y iOS. Este simulador da la oportunidad a estudiantes de ingeniería química e incluso a profesionales en el campo de la ingeniería de llevar a cabo la modelación de plantas industriales donde involucren procesos químicos empleando modelos termodinámicos y operaciones unitarias altamente precisos. Una de las herramientas también a recalcar es que le es posible al usuario el inspeccionar los cálculos en el código durante la ejecución por el hecho de ser gratuito y de libre acceso (DWSIM - The Open Source Chemical Process Simulator 2015).

El objetivo del uso de este software es demostrar que procesos operados en simuladores comerciales (Aspen HYSYS, Plus, entre otros) pueden ser simulados en un programa de libre acceso como lo es DWSIM que resulta bastante completo. Existen una infinidad de trabajos y artículos que persiguen este objetivo como Tangsriwong et al., (2020) que llevó a cabo comparaciones entre los resultados de simulación obtenidos con DWSIM y Aspen Plus encontrando que, en general, las diferencias entre los valores obtenidos en la simulación y los valores reportados fueron menores al 5%, este valor es el que buscamos para validar una simulación.

2.2.3.1. Características de DWSIM

Entre las características a mencionar tenemos que es gratuito, libre acceso y tiene una interfaz intuitiva, es decir que no se requiere de un conocimiento total para poder hacer uso del programa e incluso es posible el aprender a utilizar por cuenta propia. Cuenta con herramientas muy útiles para el análisis de procesos químicos e incluso la creación de compuestos si estos no se encuentran en la librería. En la tabla 2-1 veremos a detalle todas las características que este programa tiene.

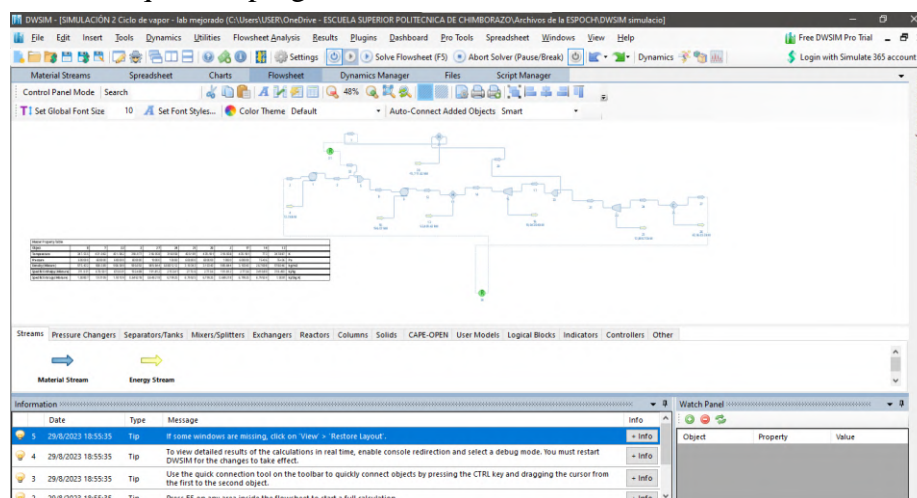


Ilustración 2-4: Interfaz de DWSIM

Fuente: (DWSIM - The Open Source Chemical Process Simulator 2023)

Tabla 2-1: Características de DWSIM

CARACTERÍSTICA	DISPONIBILIDAD
Modelos Termodinámicos	GERG-2008, PC-SAFT, CoolProp, Peng-Robinson, Peng-Robinson (1978), Soave-Redlich-Kwong, Lee-Kesler, Lee-Kesler-Plöcker, UNIFAC, Modified UNIFAC (Dortmund), UNIQUAC, NRTL, Chao-Seader, Grayson-Streed, Raoult's Law, IAPWS-IF97 Steam Tables, IAPWS-08 Seawater, Black-Oil, Sour Water y Aqueous Electrolytes
Simulación y Modelado Dinámico	Controlador PID, Programador de Eventos, Variables Monitoreadas, Integrador Configurable, Matrices de Causa y Efecto, Modo de Panel de Control en Tiempo Real, Indicadores, Medidores Analógicos y Digitales, Campos de Entrada e Interruptores.
Operaciones Unitarias	Estado estacionario: Mixer, Splitter, Separator, Pump, Compressor, Expander, Heater, Cooler, Valve, Pipe Segment, Shortcut Column, Heat Exchanger, Conversion/Equilibrium/Gibbs Reactors, PFR, CSTR, Component Separator, Orifice Plate, Distillation/Absorption Columns, Solids Separator, Cake Filter, Spreadsheet, Python Script y Flowsheet Unit Operation Estado dinámico: Mixer, Splitter, Separator, Pump, Compressor, Expander, Heater, Cooler, Valve, PFR, CSTR, Heat Exchanger, Spreadsheet and Python Script
Utilidades	Envoltura de Fase, Cálculos de Hidratos, Propiedades de Componentes Puros, Punto Crítico, Dimensionamiento de Válvulas de Seguridad (PSV), Dimensionamiento de Recipientes, Hoja de Cálculo y Propiedades de Flujo en Frío de Petróleo.
Herramientas	Ajuste de Controladores PID, Regresión de Datos Binarios, Creador de Compuestos, Caracterización de Petróleo a Granel C7+ y Curvas de Destilación, y Gestión de Caracterización y Reacciones de Petróleo.
Analizadores de Proceso	Utilidad de Optimización Multivariante con Restricciones y Análisis de Sensibilidad.
Extras	Sistema de Scripting Python/IronPython e Interfaz de Complementos (Plugins).

Fuente: (DWSIM - The Open Source Chemical Process Simulator 2023)

Realizado por: OSORIO, Julián, 2024.

2.2.4. ChemSep

Simulador de columnas comúnmente usado en operaciones de destilación, absorción y extracción donde su principal característica es el uso de un modelo clásico de equilibrio de etapas junto con un modelo de desequilibrio (en base a tasas) teniendo una interfaz intuitiva y amigable para el usuario. Tiene un uso de hasta 40 componentes y 300 etapas de equilibrio con una disponibilidad de más de 400 componentes químicos (ChemSep 2020).

2.2.4.1. Características de ChemSep

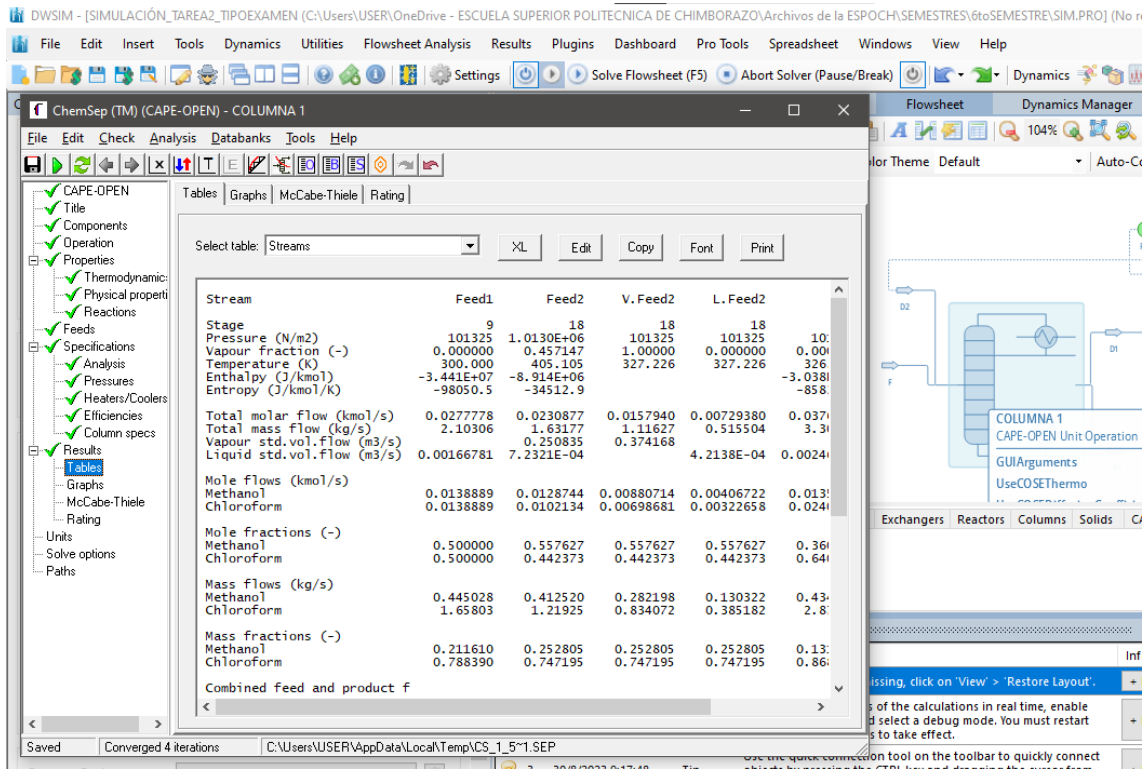


Ilustración 2-5: Interfaz de ChemSep

Fuente: (ChemSep 2020)

En la tabla 2-2 observamos las características a destacar de este programa:

Tabla 2-2: Características de ChemSep

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Potente Solucionador Industrial	La eficiencia de cálculo de ChemSep permanece elevada incluso al incorporar múltiples compuestos teniendo resultados en corto tiempo. ChemSep ha sido sometido a pruebas con diversas columnas industriales complejas y su rendimiento es sólido y no requiere que el usuario realice estimaciones iniciales.
Versátil y Personalizable	Cuenta con la tecnología CAPE-OPEN lo cual le permite ser compatible con otros entornos de simulación a diferencia de otros programas. ChemSep puede operar como un modelo de columna integrado en las principales suites de diagramas de flujo, aprovechando sus propiedades termodinámicas.
Modelado Integral y Profundo	Incluye más modelos a partir del modelo basado en tasas como modelos de coeficientes de transferencia de masa, caída de presión, entre otros. Proporciona una diversidad extensa de métodos para analizar los resultados de la simulación, incluyendo diagramas de McCabe-Thiele y diagramas operativos. Además, incorpora una función de exportación plenamente personalizable que permite guardar los resultados en Excel de manera precisa según tus preferencias.

Fuente: (ChemSep 2020)

Realizado por: OSORIO, Julián, 2024.

Estas características se ven reflejadas en el trabajo de Zhou et al., (2019) donde propone un modelo de columna paralela de etapas en equilibrio (PCM) con una estructura basada en ecuaciones flexibles llevando a cabo el desarrollo de este modelo en ChemSep, este enfoque basado en ecuaciones en el PCM facilita la incorporación de efectos de transferencia de calor en la pared, eliminando la necesidad de recurrir a software adicional.

2.2.5. *Redes Neuronales Artificiales*

Una red de neuronas artificiales que emulan el comportamiento de neuronas reales constituye una ANN (Artificial Neuronal Network), un modelo computacional que emplea los patrones de redes neuronales biológicas para simular fenómenos. Las ANN presentan múltiples ventajas, como la transmisión de datos entre entradas y salidas, alta capacidad de procesamiento para resolver problemas complejos, respuesta ante datos con ruido, así como compatibilidad en red, tolerancia a errores y capacidad de aprendizaje, todos estos atributos son beneficios de las ANN. La neurona se configura como la unidad básica de análisis de datos. Los números actúan como datos de entrada y salida en la unidad neuronal. Los datos de entrada se introducen en la capa de entrada completa de la red y posteriormente se transmiten a las capas ocultas. Finalmente, las respuestas de la red se almacenan en la capa de salida. La fortaleza de las ANN radica en modelar sistemas no lineales, aprender y reconocer patrones distintos, así como ajustar sus parámetros (Zafari, Ghaemi 2023).

En la ilustración 2-6 tenemos la estructura de una ANN, las variables independientes (Input), capas ocultas (hidden layers), bias y la variable dependiente (output). Las líneas que unen a los círculos son los recorridos que los datos hacen que mediante entrenamiento pueden llegar hasta una respuesta acertada que es lo que se busca en la salida.

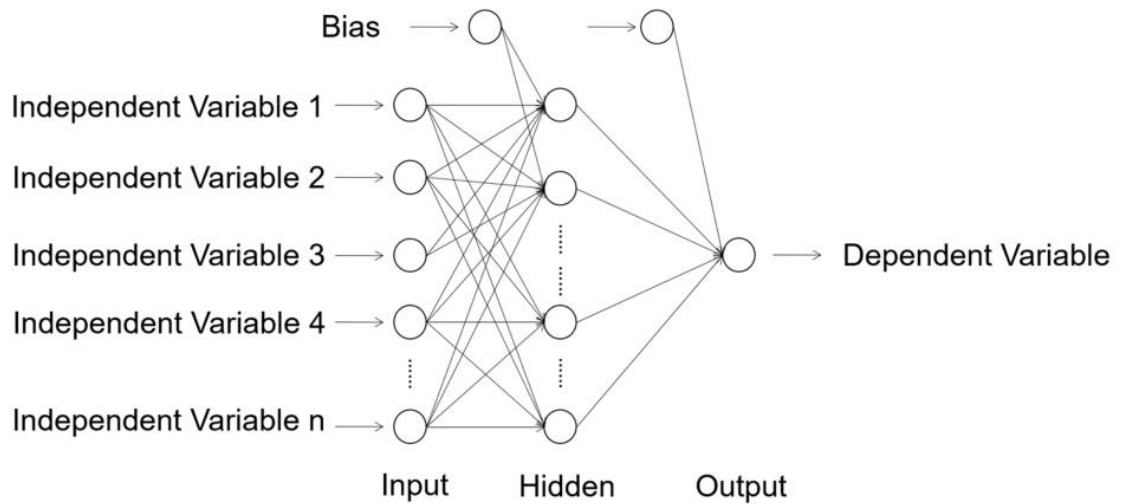


Ilustración 2-6: Estructura Algorítmica de una red neuronal artificial (ANN).

Fuente: (Li, Zhang, Liu 2017)

2.2.6. *Neural Network Toolbox de MATLAB*

MATLAB® representa el entorno de computación más eficaz y eficiente para profesionales en ingeniería y ciencias. A través de capacidades en matemáticas, gráficos y programación, su diseño se ajusta a tu estilo de pensamiento y a las tareas que llevas a cabo (MathWorks 2023).

La Neural Network Toolbox es una utilidad específica de MATLAB que se enfoca en la creación, entrenamiento, representación gráfica y simulación de redes neuronales, ya sean superficiales o profundas. Estas redes neuronales se generan mediante aplicaciones y algoritmos de entrenamiento, con el propósito de llevar a cabo la predicción de series temporales y el control de sistemas dinámicos (Beale, Hagan, Demuth 2010).

CAPITULO III

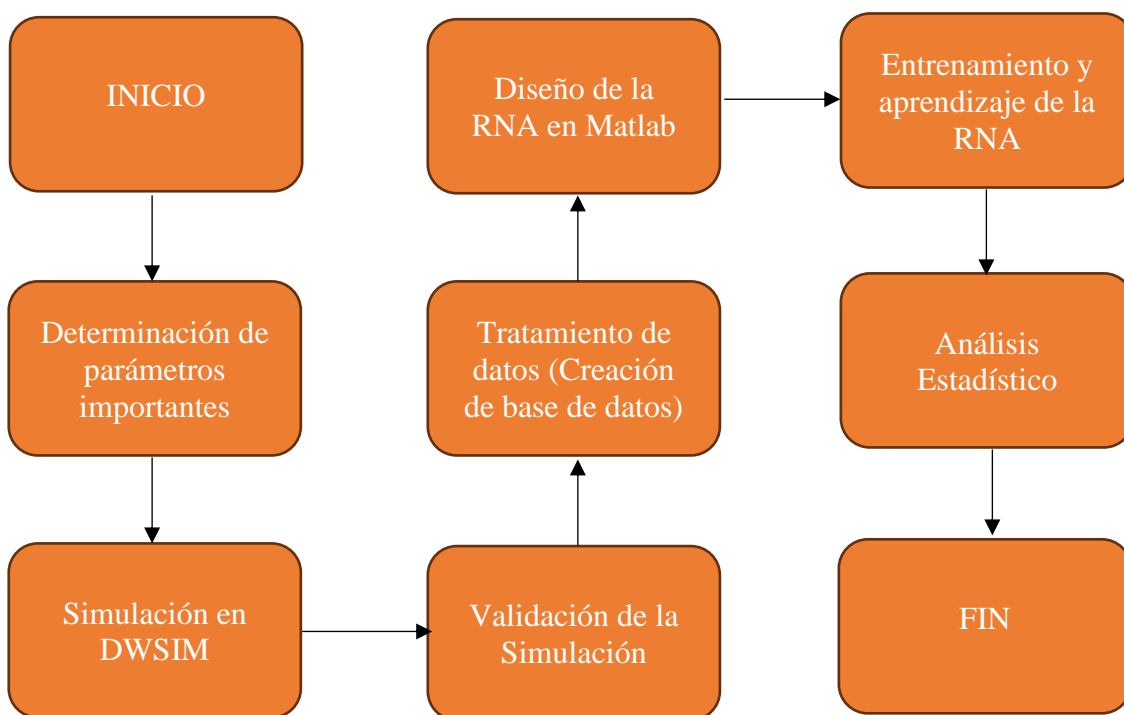
3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología empleada

En el desarrollo del presente trabajo de titulación se utiliza la metodología experimental en la realización de este estudio, ya que después de completar y verificar la simulación, se modificarán las variables operativas de la CDU (Crude Distillation Unit). Esto se hace con el objetivo de establecer la base de datos necesaria para entrenar y validar la red neuronal artificial. Se verificarán las predicciones de la RNA mediante un análisis estadístico.

3.2. Etapas de la metodología

En base a un criterio analítico usado con el objetivo de recaudar información de manera intensa acerca del funcionamiento y operación de una CDU en bibliografía de relevancia, el trabajo de titulación tiene las siguientes etapas:



Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Este trabajo propone el uso de una Red Neuronal Artificial en los procesos relacionados con el fraccionamiento de petróleo, específicamente la unidad de destilación de crudo (CDU). Esta red tiene la capacidad de calcular y prever los posibles cambios en las características de los productos cuando se modifica la configuración y estructura de la

columna de destilación. La investigación se lleva a cabo de manera cuantitativa, ya que la creación y entrenamiento de la RNA requiere un banco de datos obtenido a través de la simulación en el programa de código abierto DWSIM.

Adicional a la RNA funcional, se realiza un análisis estadístico detallado de los resultados de la RNA, comparándolos con los datos de la simulación. Este análisis persigue el fin de validar e interpretar como herramienta para medir la correlación de las desviaciones entre los valores predichos y los valores simulados. Se calcula un valor de error para obtener un grado de confiabilidad en los resultados y así conocer si las predicciones son correctas o no.

Las fuentes usadas para el desarrollo de este trabajo son:

Fuente primaria:

- Conocimientos y experiencias adquiridos por el autor a través de técnicas experimentales en la simulación de procesos utilizando el programa DWSIM, así como el procesamiento de datos mediante el uso de Matlab y Excel.

Fuentes secundarias:

- Libros físicos y digitales de contenidos relacionados al fraccionamiento del crudo y el funcionamiento de una unidad de destilación de crudo.
- Artículos científicos de alto impacto con relación al tema de este proyecto y publicados en revistas indexadas.
- Trabajos con el fin de obtener maestrías y doctorados por instituciones académicas internacionales.
- Sitios web oficiales de los diversos programas informáticos utilizados en este proyecto de tesis.

3.3. Determinación de parámetros importantes

Para la implementación de esta tecnología, se utiliza como referencia para la simulación en DWSIM el artículo científico publicado en la revista "Chemical Engineering Research and Design" titulado "*Optimal design of flexible heat-integrated crude oil distillation units using surrogate models*". Este artículo fue propuesto por Dauda Ibrahim, del Laboratorio de procesos de Energía limpia, parte del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Imperial College London en el campus South Kensington en London. Megan Jobson y Jie Li, miembros del centro para la integración de procesos, parte de la Escuela de Ingeniería Química y Ciencia Analítica de la Universidad de Manchester y

Gonzalo Guillén-Gosálbez, miembro del departamento de Química y Biociencia aplicada del Instituto para Química y Bioingeniería.

3.3.1. Descripción del proceso

La torre de destilación de crudo estudiada en este proyecto es en base a un caso de estudio donde se tiene una columna de destilación de crudo que separa 100 000 BPD ($662.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) de un crudo liviano de origen Venezolano nombrado “Tia Juana” (Watkins 1979) en Nafta Ligera (LN), Nafta Pesada (HN), Destilado Ligero (LD), Destilado Pesado (HD) y Residuo (R). Este trabajo trabaja con una torre de destilación que es propuesta por Chen (2008) en su tesis de doctorado el cual en su caso de estudio 6.1 es basada en un la tesis de doctorado de M. A. Gadalla (2003) donde la columna principal opera con un total de 5 secciones (S-1 a S-5) y tres separadores laterales (side-stripper) (S-6 a S-8). El crudo con el nombre “Tia Juana” es alimentado a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de 2.5 bar a un Heater el cual hace que el crudo pase por un proceso de precalentamiento hasta una temperatura de $365 \text{ }^\circ\text{C}$ y entra a la unidad de destilación. Esta columna tiene un total de 41 etapas donde se alimenta al crudo por la etapa 37 y agua como vapor a una razón de 1200 kmol/h ($260 \text{ }^\circ\text{C}$, 4.5 bar) en la etapa 41 lo cual hace que el proceso sea más eficiente, la torre cuenta con tres salidas de los productos (HN, LD y HD) a los side-strippers y tres retornos de estos a la torre principal para aumentar la eficiencia en la separación y obtención de productos deseados. Los side-strippers son de 7, 8 y 6 etapas para HN, LD y HD respectivamente siendo alimentados por la etapa 1, incluyendo que estos separadores son una simple destilación que cuentan con un reboiler y en el separador lateral para el HD ingresa agua como vapor a una razón de 250 kmol/h por la etapa 5. Los sidestreams de la torre principal hacia los separadores laterales son por la etapa 9, 17 y 27. El reingreso de producto destilado de los separadores entra por la etapa 8, 16 y 26. La torre cuenta con tres pump-around acorde a cada producto que se desea obtener (HN, LD y HD) trabajando en las etapas 9-7, 17-15 y 27-25. Estos pump-around trabajan con una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y $30 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente al orden antes mencionado. Finalmente, la unidad de destilación de crudo trabaja con una razón de reflujo de 4.17. (Ibrahim et al. 2021)

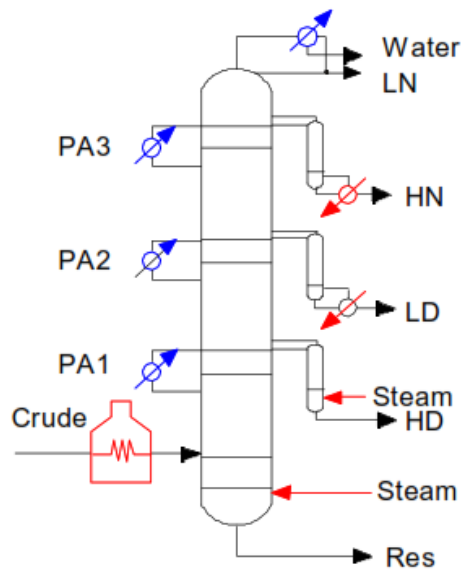


Ilustración 3-1: Unidad de destilación de crudo usada base

Fuente: (Chen 2008)

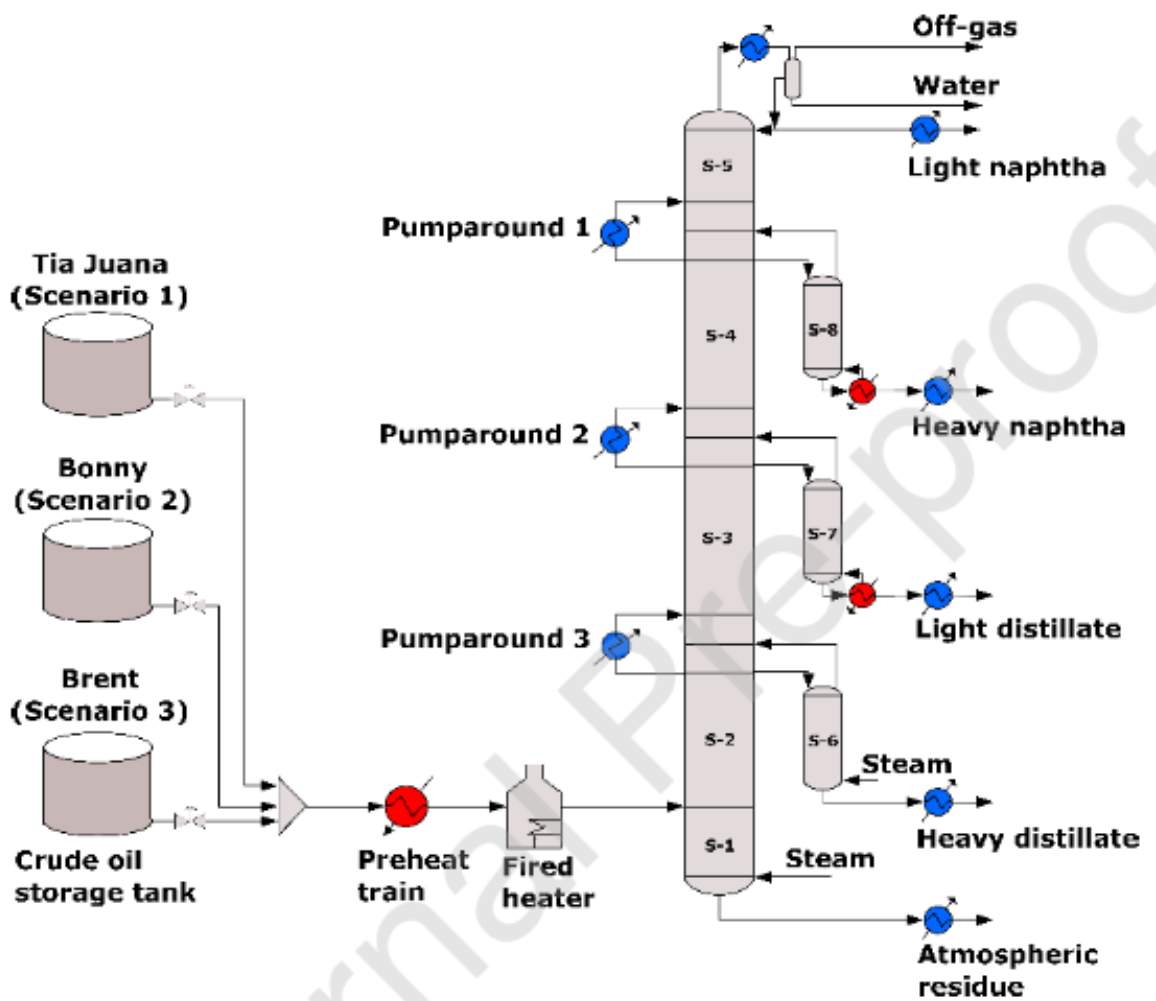


Ilustración 3-2: Configuración de la Unidad de Destilación de Crudo a estudiar

Fuente: (Ibrahim et al. 2021)

3.3.2. Destilación TBP en el proceso

El análisis del Punto de Ebullición Verdadero (TBP) o True Boiling Point según la norma ASTM D-2892 es la única herramienta confiable para la caracterización de petróleo crudo y mezclas de petróleo en términos de su distribución de puntos de ebullición y esto acorde al volumen vaporizado y a la temperatura a la que ocurre. (Nedelchev et al. 2011)

Antes del proceso de destilación se tienen datos del crudo a destilar caracterizado con la técnica de TBP siendo así con porcentajes de volumen vaporizado y a la temperatura a la que sucedió incluyendo también datos como gravedad API y densidad de este crudo que se caracteriza como liviano.

Tabla 3-1: Destilación TBP del crudo Tia Juana

Nombre	Tia Juana light
País de Origen	Venezuela
Tipo	Liviano
Densidad (Kg/m³)	867.6
Gravedad API	31.6
Vol. %	Temperatura (°C)
0	36.1
5	64.4
10	100.6
20	163.9
30	221.1
40	278.9
50	337.2
60	397.2
70	463.9
80	545.0

Fuente: (Ibrahim et al. 2021)

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.3.3. Condiciones Operativas para el proceso

Tabla 3-2: Parámetros de diseño para el proceso de destilación en la CDU.

Parámetro	Tia Juana light
Número de etapas en la CDU	41
Numero de etapas en separadores laterales – HN, LD, HD	7, 8, 6
Etapas de alimentación del crudo	37
Etapas de alimentación del vapor en la CDU	41
HN side-stripper etapas de extracción y retorno	9, 8
LD side-stripper etapas de extracción y retorno	17, 16

HD side-stripper etapa de extracción y retorno	27, 26
Pump-around 1 etapa de extracción y retorno	9-7
Pump-around 2 etapa de extracción y retorno	17-15
Pump-around 3 etapa de extracción y retorno	27-25

Fuente: (Ibrahim et al. 2021)

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Tabla 3-3: Condiciones Operativas para el proceso completo de destilación

Condición Operativa	Tia Juana light
Alimentación del Crudo (m ³ /h)	662.4
Presión del crudo (bar)	2.5
Temperatura del crudo a la CDU (°C)	365
Alimentación de vapor en la CDU (Kmol/h)	1200
Alimentación de vapor en HD side-stripper (Kmol/h)	250
Presión de la CDU (bar)	2.5
Razón de Reflujo	4.17
Pump-around 1	
Temperatura (°C)	20
Flowrate (Kmol/h)	1500
Pump-around 2	
Temperatura (°C)	50
Flowrate (Kmol/h)	2500
Pump-around 3	
Temperatura (°C)	30
Flowrate (Kmol/h)	500
Sidestream 1 (LN)	
Fase	Vapor
Etapa	1
Molar Flow (Kmol/h)	1400
Sidestream 2 (HN)	
Fase	Líquida
Etapa	9
Molar Flow (Kmol/h)	1379
HN Side-stripper	
Flowrate del destilado a reingresar a CDU (Kmol/h)	883
Flowrate del producto (Kmol/h)	496

Presión (atm)	1
Sidestream 3 (LD)	
Fase	Líquida
Etapa	17
Molar Flow (Kmol/h)	800
LD Side-stripper	
Flowrate del destilado a reingresar a CDU (Kmol/h)	147
Flowrate del producto (Kmol/h)	653
Presión (atm)	1
Sidestream 4 (HD)	
Fase	Líquida
Etapa	27
Molar Flow (Kmol/h)	300
HD Side-stripper	
Flowrate del destilado a reingresar a CDU (Kmol/h)	401
Flowrate del producto (Kmol/h)	149
Presión (atm)	1

Fuente: (Ibrahim et al. 2021)

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.3.4. Método de prueba ASTM D86

Este método estándar de prueba se utiliza para destilar productos petrolíferos y combustibles líquidos a presión atmosférica. Su característica principal radica en proporcionar los puntos de ebullición de una mezcla de sustancias petrolíferas. Las características de destilación (volatilidad) de los hidrocarburos tienen un efecto importante en su seguridad y rendimiento, especialmente en el caso de combustibles y solventes. El rango de ebullición proporciona información sobre la composición, las propiedades y el comportamiento del combustible durante su almacenamiento y uso. Esto quiere decir que resulta importante el evaluar la calidad de los productos que obtenemos ya que se le proporciona al usuario y se conoce la eficiencia y rendimiento que tendrá en el uso. (ASTM 2015)

Tabla 3-4: Tipo de producto y calidad [ASTM D86]

Calidad (°C) [ASTM D86]		
Productos	T5%	T95%
LN	25.99	110.56
HN	138.89	186.57
LD	215.96	301.47
HD	310.66	354.38
R	361.40	754.31

Fuente: (Ibrahim et al. 2021)

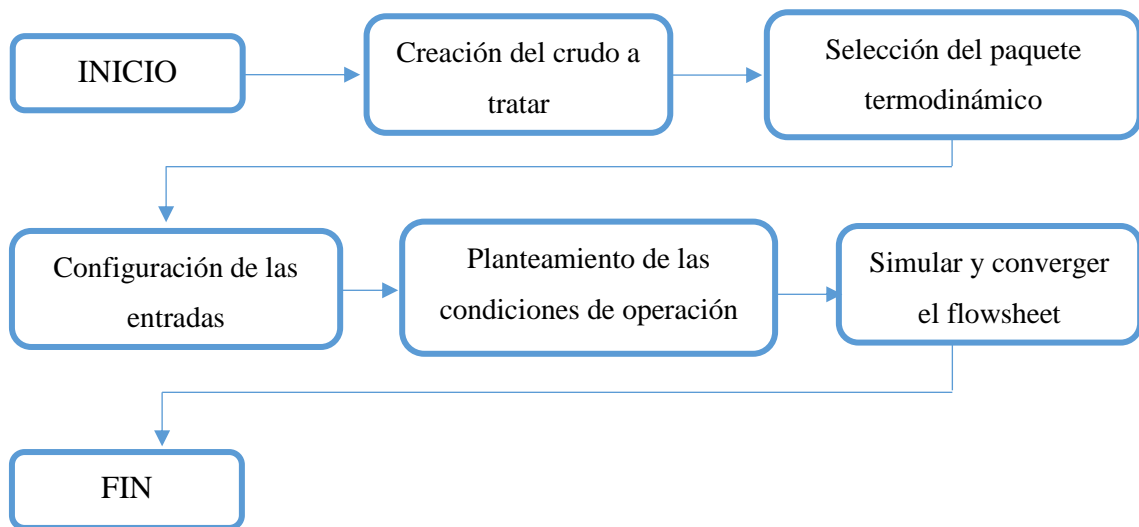
Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.4. Simulación mediante DWSIM

La simulación del proceso se ha adaptado a los equipos que el programa dispone ya que este es un software de código abierto, a diferencia de programas con licencia pagada como Aspen HYSYS ® o Aspen Plus los cuales disponen de una mayor cantidad de compuestos, herramientas y equipos para la simulación. En este caso se ha adaptado un proceso simulado en Aspen HYSYS ® en DWSIM con los equipos disponibles para construir una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) lo cual en Aspen ya lo dispone.

3.4.1. Proceso aplicado para la simulación en DWSIM

Se ha empleado un proceso el cual se detalla en el siguiente diagrama de flujo teniendo un total de 5 pasos, dándole una mayor importancia a la creación del crudo en el programa ya que acorde a las características de este nos dará un resultado acercado o no a los datos tanto de campo como de lo simulado en Aspen HYSYS ®. Es importante también la selección del paquete termodinámico ya que, tratándose de un hidrocarburo, el cambio de paquete podría variar en las propiedades termodinámicas y los cálculos que se realicen en el programa. El proceso se simula en DWSIM v. 8.6.7 la cual se puede descargar en su sitio web <https://dwsim.org/index.php/download/>



Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.4.2. Creación del crudo a tratar

Abrimos DWSIM hasta que nos dirija a la página de inicio donde encontraremos una ventana como la que se muestra en la ilustración 3-3, nos dirigimos a la sección de “Modelado de procesos” y le damos click en la opción que diga “Crear nuevo”.

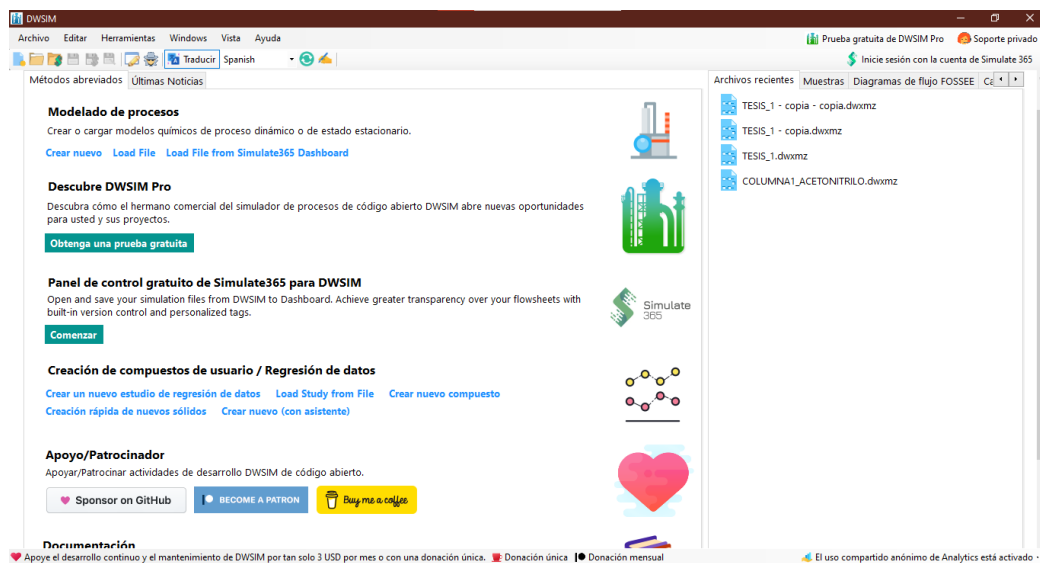


Ilustración 3-3: Interfaz Inicial de DWSIM.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024

Después de seleccionar esta opción nos dará la bienvenida a una pestaña que es un asistente para la configuración de la simulación. Como podemos observar, en la pestaña en la parte izquierda encontramos un índice que serán los puntos que iremos revisando para configurar la simulación.

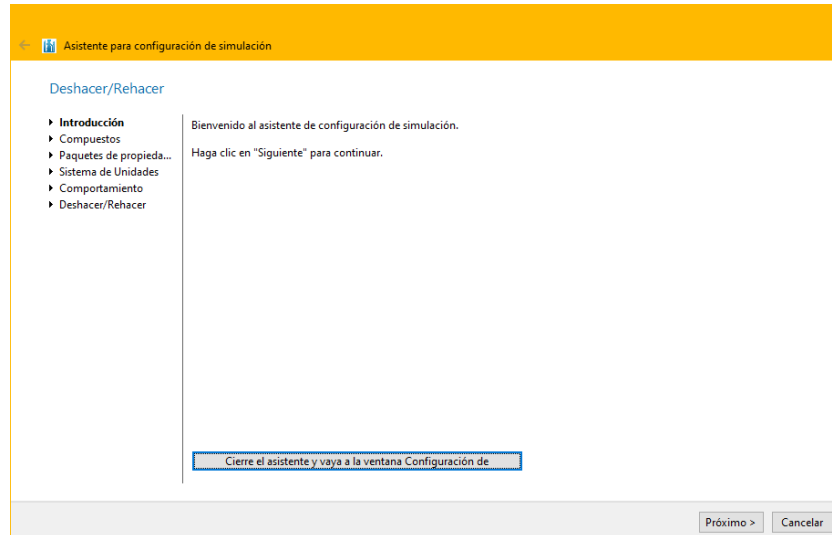


Ilustración 3-4: Pestaña de Introducción para la configuración de la simulación.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En la siguiente pestaña tendremos ya el añadir el o los compuestos a usar en la simulación, en nuestro caso crearemos uno ya que el programa no cuenta con el compuesto o el hidrocarburo exactamente como nosotros lo tenemos para su procesamiento en el proceso. Seleccionamos la opción que dice “Agregar desde otras”, se nos desplegará otras opciones y seleccionamos “Create From Distillation Curves Petroleum Assay Data”, escogemos esta opción ya que tenemos datos de una curva de destilación TBP lo cual en esta opción nos permite caracterizarlo con estos datos y algunas otras opciones que hacen que sea más completa la creación del crudo a procesar.

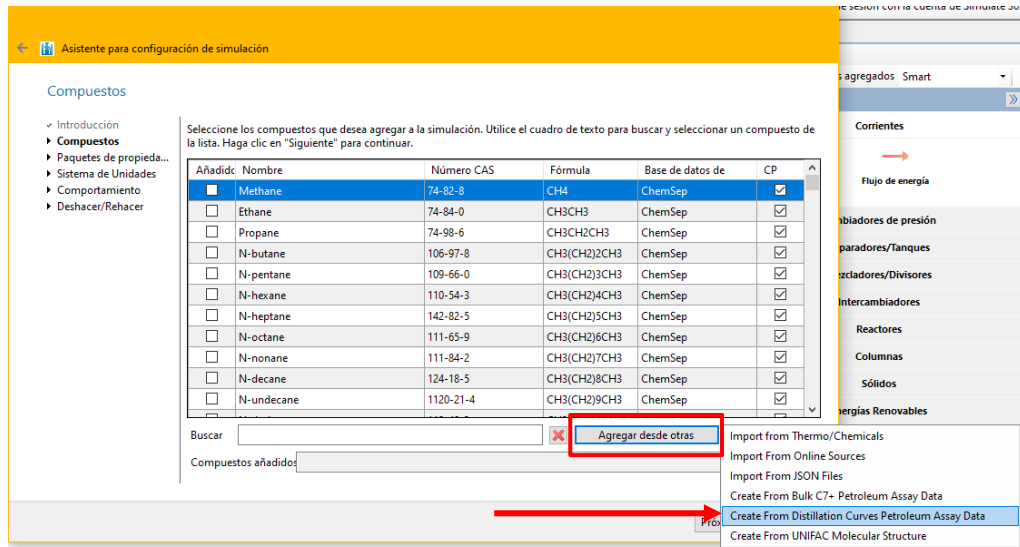


Ilustración 3-5: Interfaz de adición de compuestos para la simulación.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

A continuación, se nos presentará la Pestaña para la caracterización del crudo a partir de curvas de destilación. Después de seleccionar la opción “Siguiente >” nos dirigirá a la selección del tipo de curva de destilación junto con los datos que tengamos del crudo que deseamos caracterizar, en nuestro caso seleccionamos “True Boiling Point (TBP) (ASTM D2892)”, colocamos el valor de 31.6 en “API Gravity” y le damos click en “Siguiente >”.

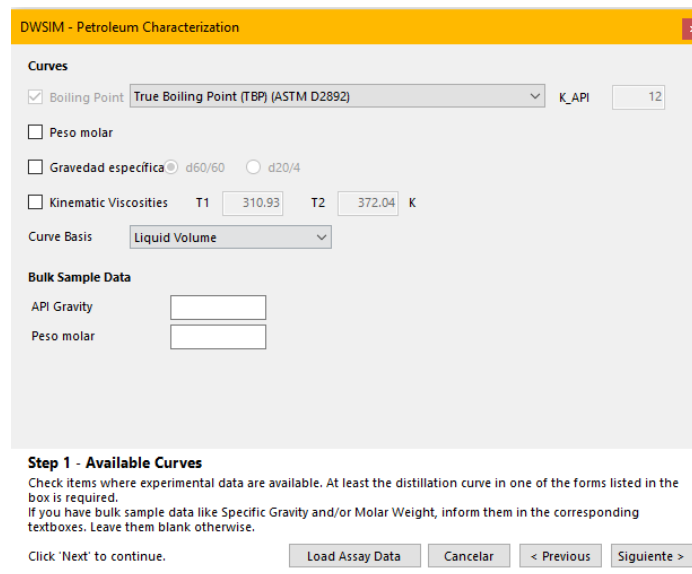


Ilustración 3-6: Selección de la curva de destilación

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Ingresamos los datos de la curva de destilación TBP que tenemos del crudo y que se especifican en la tabla 3-1, es importante tener en cuenta las unidades que tengamos ya que de por sí el programa trabaja con temperaturas en grados Kelvin, esto lo podemos cambiar más adelante, pero necesitamos ingresar los datos en esta pestaña en los grados

especificados por ende realizamos una conversión antes de. Los datos que tenemos en grados Centígrados los pasamos a Kelvin sumando 273.15 al valor ya que el programa trabaja con este valor en su base de datos.

% VAP	Temperatura (K)
0	309.25
5	337.55
10	373.75
20	437.05
30	494.25
40	552.05
50	610.35
60	670.35
70	737.05
▶ 80	818.15
*	

Step 2 - Experimental Data
Enter experimental data as a function of vaporized liquid percentage. At least six points are required for each curve.

Click 'Next' to continue.

Save Assay Data Cancelar < Previous Siguiente >

Ilustración 3-7: Ingreso de los datos de la curva de destilación TBP

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En la siguiente pestaña que es el paso 3 nos presentará el gráfico de la curva de destilación de nuestro crudo a partir de los datos que le proporcionamos, le damos en “Siguiente >” y nos dirigirá al paso 4 donde ingresaremos el número de pseudocomponentes que el crudo contendrá como tal, nosotros tenemos un total de 25 pseudocomponentes. Al darle click en “Siguiente >” después de haber colocado el número de pseudocomponentes, nos presentará la gráfica de la curva de destilación con los 25 pseudocomponentes distribuidos en la curva y los cortes que realiza como se presenta en la ilustración 3-8.

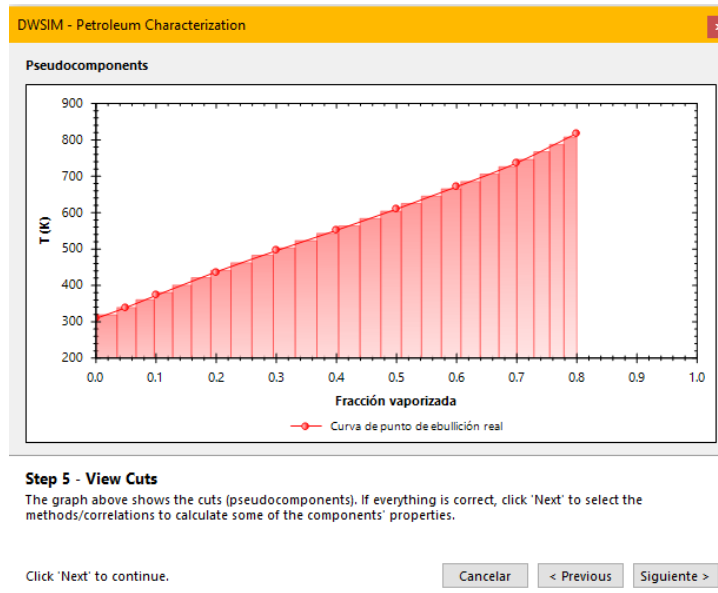


Ilustración 3-8: Curva de destilación “Tía Juana” y pseudocomponentes

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

El siguiente paso es la selección de métodos y correlaciones para el cálculo de las propiedades de los pseudocomponentes, esto en base a la naturaleza de estos. Para nuestro caso hemos utilizado para la Temperatura y Presión crítica el modelo de Riazi-Daubert (1985), para el Factor acéntrico se usó el modelo de Korsten (2000), la Gravedad específica fue calculado con el modelo Riazi-Al-Sahhaf (1996), el peso molar con el modelo de Winn (1956) y la Viscosidad cinemática mediante el modelo de Abbott (1971).

Step 6 - Methods and Correlations
Select the methods and correlations to calculate the pseudocomponents' properties.

Click 'Next' to continue.

Ilustración 3-9: Elección de métodos y correlaciones para cálculo de propiedades de pseudocomponentes

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En el último paso de la creación del crudo a procesar tenemos los resultados que serían las propiedades de los 25 pseudocomponentes que posee. En esta pestaña se nos permite revisar de todas las propiedades calculadas por el programa con sus valores y todos estos nos da un punto de ebullición normal de 489.65 °C y una gravedad API calculada de 41.0434 lo cual equivale a un error del 29.88% de error.

DWSIM - Petroleum Characterization

Resultados

Nombre	Fracción molar	NBP (C)	SG	MW (kg/kmol)	Tc (C)	Pc (bar)	Ac. Factor
C_3800_NBP_46	0.0933781	45.8803	0.711797	74.1737	223.264	39.1728	0.205513
C_3800_NBP_66	0.0767393	66.4863	0.732031	83.8437	248.473	36.7295	0.231678
C_3800_NBP_87	0.0677355	86.957	0.750464	94.1417	272.867	34.4157	0.257992
C_3800_NBP_107	0.0620872	107.379	0.767422	105.111	296.615	32.2385	0.284568
C_3800_NBP_128	0.0582642	127.775	0.783116	116.767	319.792	30.2017	0.31145
C_3800_NBP_148	0.0554887	148.152	0.797709	129.121	342.45	28.3041	0.338672
C_3800_NBP_169	0.0532428	168.512	0.811333	142.179	364.627	26.5414	0.366267
C_3800_NBP_189	0.0511174	188.854	0.824097	155.948	386.357	24.9069	0.394275
C_3800_NBP_209	0.0487988	209.183	0.836099	170.435	407.671	23.3925	0.42274
C_3800_NBP_230	0.04612	229.504	0.847424	185.651	428.603	21.9897	0.451718
C_3800_NBP_250	0.0430999	249.827	0.858144	201.608	449.184	20.6899	0.481272

You can edit/update the values on the above table before creating the oil stream.

Step 7 - Results
The table above shows the characterization results. Click 'Finalize' to exit and add a Material Stream to the simulation with the created pseudocomponents.

Stream name:

Ilustración 3-10: Propiedades calculadas de los pseudocomponentes creados.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.4.3. Selección del paquete termodinámico

Después de haber creado la mezcla de hidrocarburos a procesar es esencial seleccionar un paquete termodinámico que cumpla con la naturaleza del compuesto y que no se presente error al calcular incluso acercándose a datos de campo. En el caso de tener compuestos orgánicos o hidrocarburos en nuestro estudio es recomendable trabajar con Peng-Robinson (PR), Raoult's Law como auxiliar.

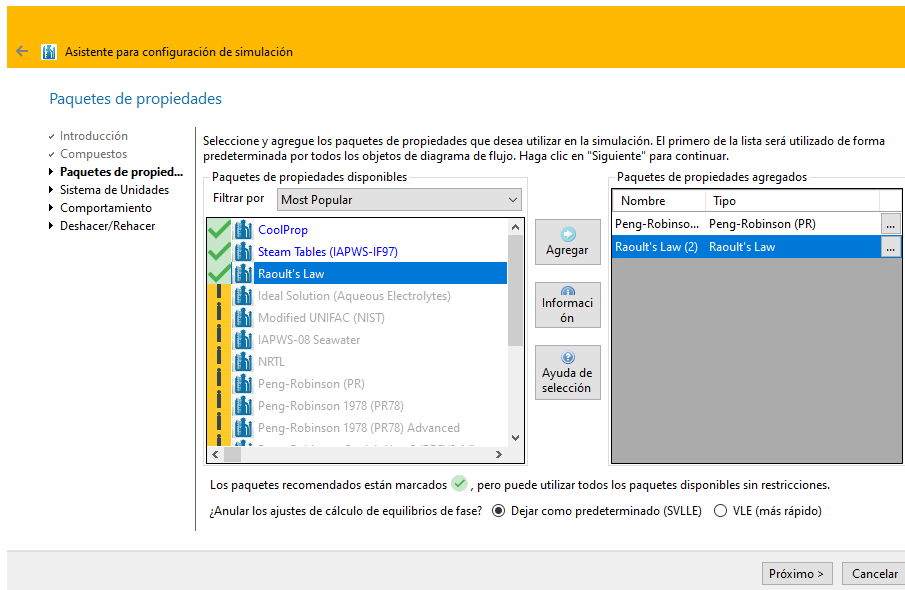


Ilustración 3-11: Selección de paquetes termodinámicos.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.4.4. Configuración de las entradas

El sistema de unidades a usar dependerá de las unidades que usen los trabajos de investigación que usamos para la simulación, en nuestro caso tenemos que cambiar algunas unidades ya que las que presenta el programa están en el Sistema Internacional (SI) mientras que en los artículos varían algunas en las entradas y en las salidas. Manejar el mismo sistema de unidades que los artículos nos facilitará el ingreso de datos y comparación de resultados. En la ilustración 3-12 se presentan las unidades a usar en esta simulación.

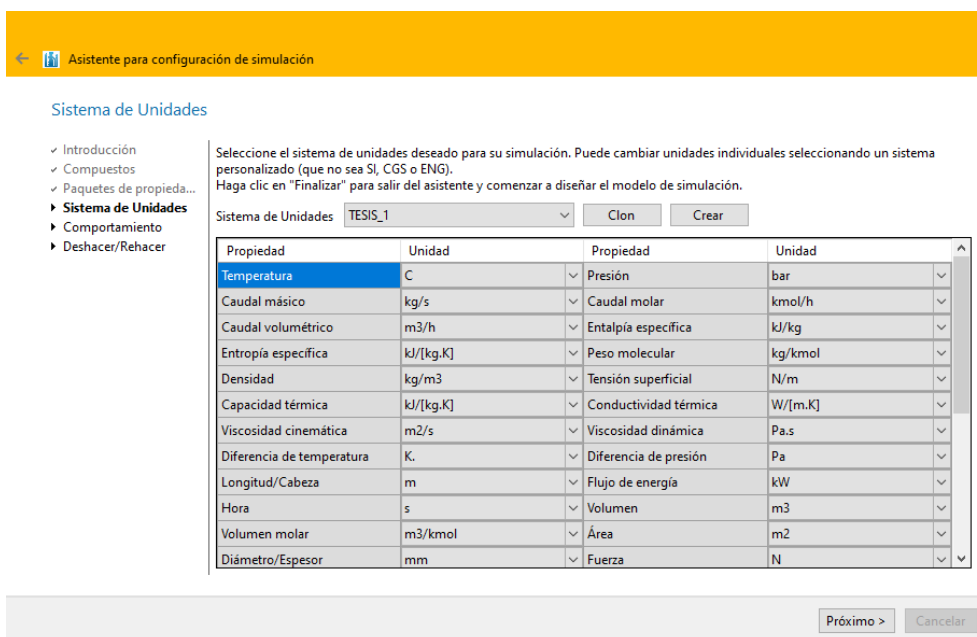


Ilustración 3-12: Sistema de Unidades a usar en la simulación.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Ya creado el crudo a tratar procedemos a ubicarlo como inicio del proceso con sus respectivos valores de entrada junto a la conexión al precalentador que hará que pasé de 25 °C a 365°C que es la temperatura deseada de entrada para la Unidad de Destilación de Crudo (CDU).

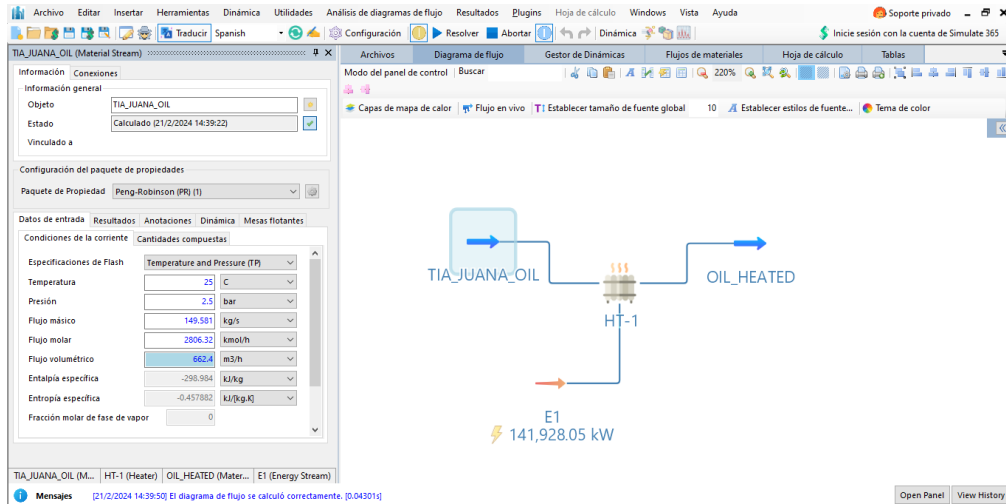


Ilustración 3-13: Valores de entrada del crudo a tratar

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.4.5. Planteamiento de las condiciones de operación

Agregamos la torre de fraccionamiento principal en la unidad de destilación de crudo (CDU) con el nombre de “CSCOL-1” usando una herramienta que DWSIM proporciona para la destilación, esto lo podremos encontrar en la sección de “Columnas” y añadimos la “Columna ChemSep” arrastrándola al flowsheet. Esta columna se vincula con el programa ChemSep el cual es un programa específicamente para simular procesos de destilación.

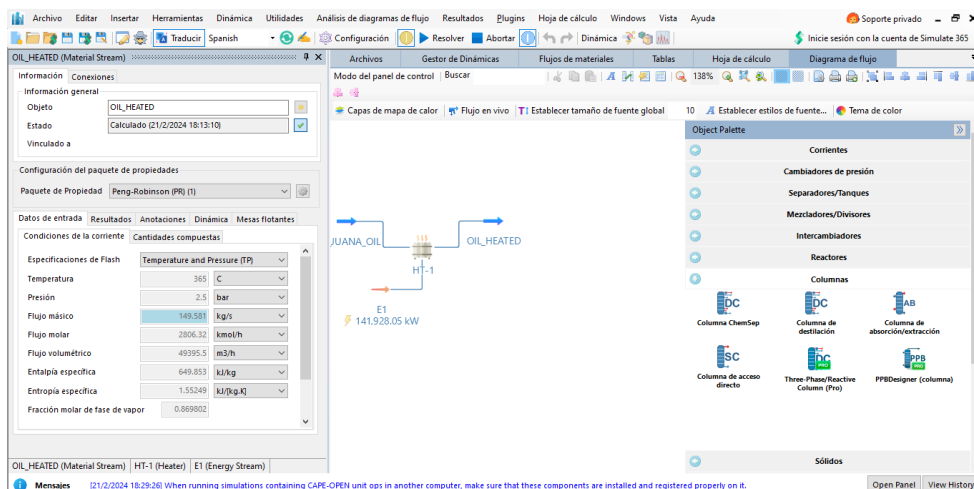


Ilustración 3-14: Selección de la columna para el proceso de destilación.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

A continuación, se nos desplegará una ventana donde se nos presentan algunas opciones, la única que es importante cambiar es la de “Thermo” seleccionando la opción de ChemSep. Si no hacemos este cambio, la columna no trabajará con el programa de ChemSep directamente y no podremos usar las funciones que este ofrece para el proceso de destilación.

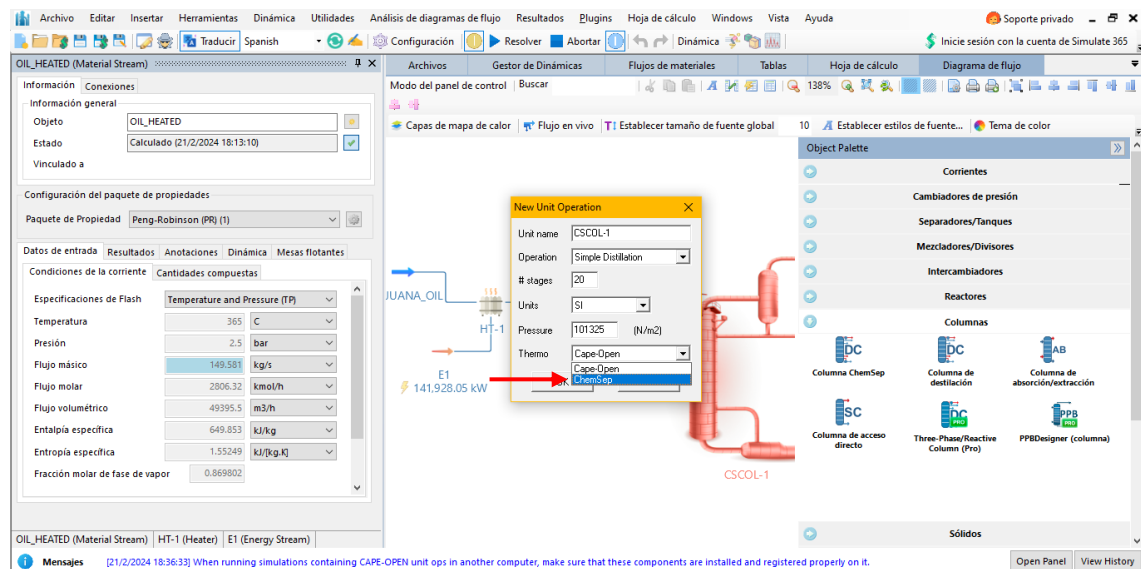


Ilustración 3-15: Selección de la Columna ChemSep.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Se nos presenta la interfaz del programa de ChemSep el cuál iremos modificando en base al proceso que deseamos simular, en este caso desde este punto no es muy útil la tabla 4 ya que en ella presenta todas las especificaciones para el diseño de la torre y la tabla 5 la usaremos para las condiciones operativas de la torre de fraccionamiento.

El siguiente paso está en irnos a la sección de “Operation” donde como primera instancia ingresaremos dos entradas y cinco salidas de la torre ya que si ingresamos los tres reingresos que tenemos a partir de los side-strippers no nos convergerá la torre ya que no se podrá calcular correctamente los balances de masa. La torre de fraccionamiento es una columna compleja ya que en el condensador tendrá un producto parcial (L & V product) y no cuenta con un reboiler, tiene 41 etapas por las cuales en la etapa 37 se la alimenta con el crudo y en la 41 con agua en fase de vapor (260 °C, 4.5 bar), los sidestreams o extracciones se las hacen en las etapas 1, 9, 17 y 27 mientras que los pump-arounds en las etapas 9>7, 17>15 y 27>25 (> significa desde que etapa a que etapa va).

El modelo termodinámico por usar es Raoult's Law/ Ideal gas law/ Ideal solution/ Antoine/ Peng-Robinson 76. En la ilustración 3-16 y 3-17 se encuentra ingresado los datos ya mencionados.

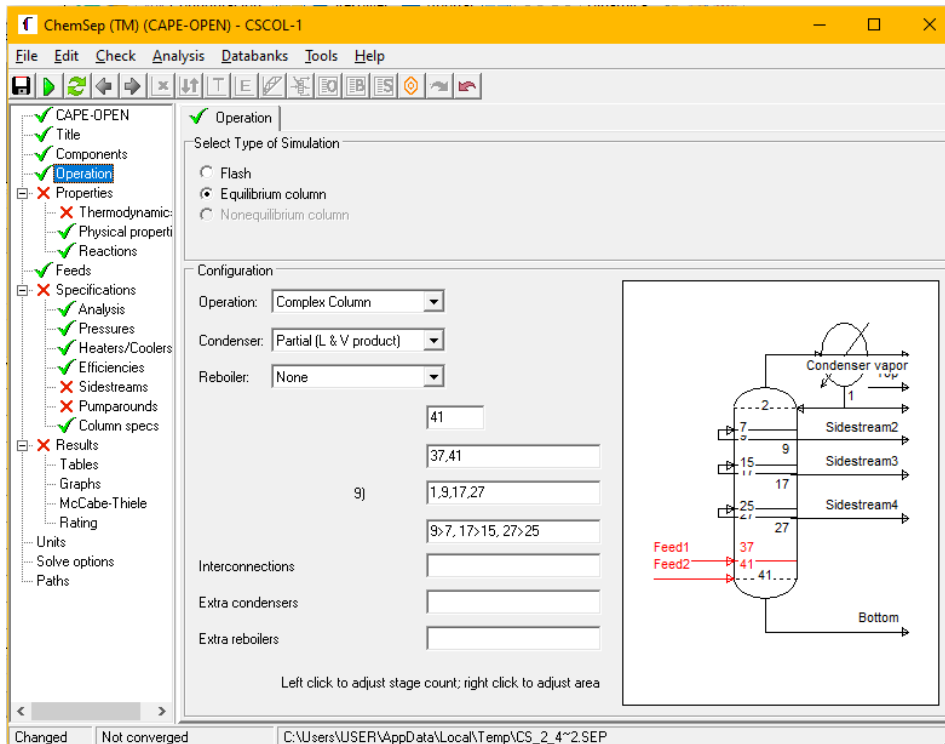


Ilustración 3-16: Diseño inicial de la CSCOL-1

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

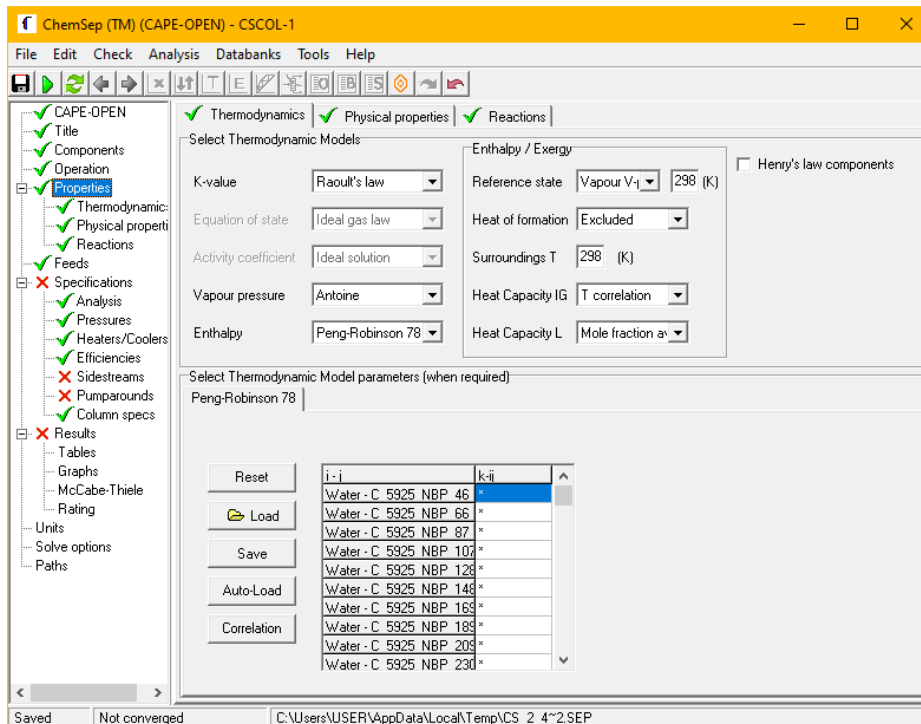


Ilustración 3-17: Propiedades operativas de la columna CSCOL-1

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Para ingresar las condiciones operativas nos basaremos en la tabla 3-3 completando así la presión a la que trabaja la torre, los pump-arounds junto sus condiciones operativas y en las especificaciones de la comuna (Column specs) seleccionaremos en Top specification al Reflux ratio ingresando el valor.

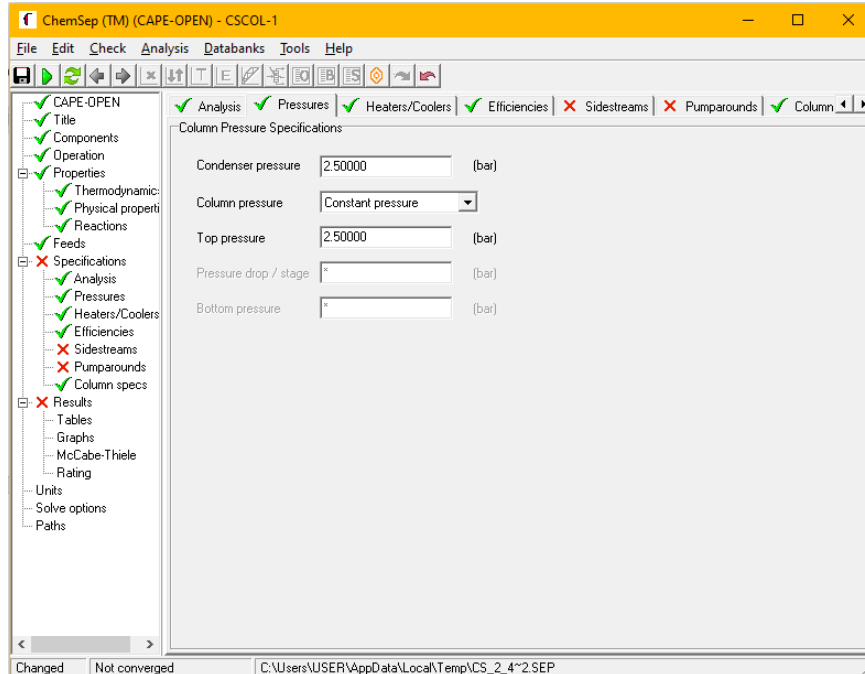


Ilustración 3-18: Presión a la que trabaja CSCOL-1.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

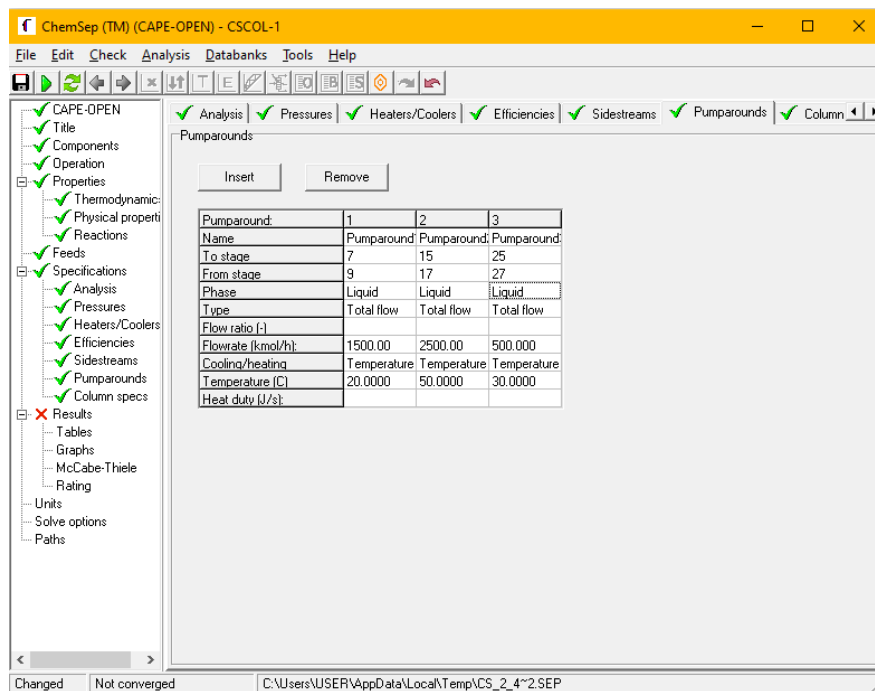


Ilustración 3-19: Condiciones operativas para los pump-arounds de CSCOL-1

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

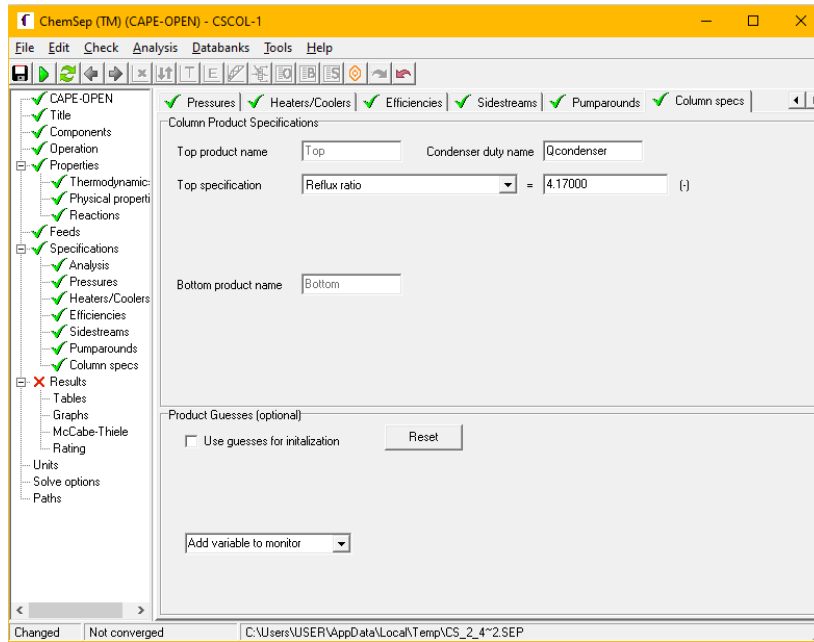


Ilustración 3-20: Especificación operativa de la columna CSCOL-1.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En el caso de los sidestreams no ingresaremos los valores que tenemos en la tabla 5 en primera instancia ya que como ya se mencionó los balances de masa no podrán ser calculados y por ende la columna no convergerá. Primero se ingresan los valores de 400, 800, 800 y 300 Kmol/h en los sidestreams de Condenser Vapor, Sidestream 2, Sidestream 3 y Sidestream 4 respectivamente.

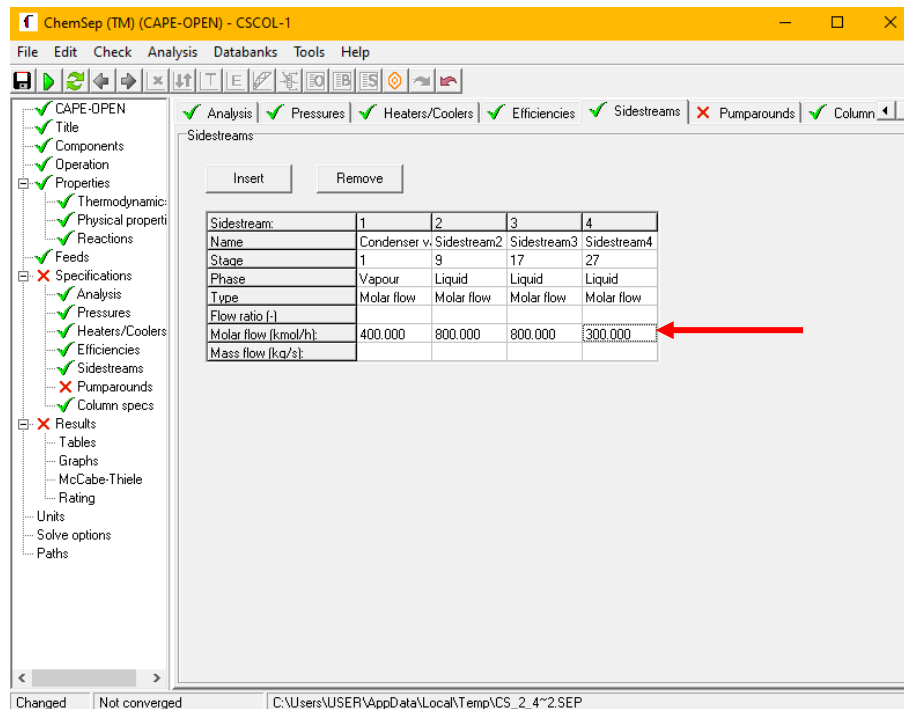


Ilustración 3-21: Condiciones operativas iniciales para los sidestreams.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Después de haber ingresado los datos, condiciones y especificaciones para la operación de la columna principal “CSCOL-1” se tiene una parte de la Unidad de Destilación de Crudo (CDU) como tal. En la ilustración 3-22 se observa la etapa inicial de la Unidad teniendo la “CSOL-1” como la torre de fraccionamiento y las salidas TOP, LN, HN-STRIPPER, LD-STRIPPER, HD-STRIPPER y RESIDUE. Las salidas con el nombre “STRIPPER” hacen referencia a que les falta procesamiento lo cual completará la CDU.

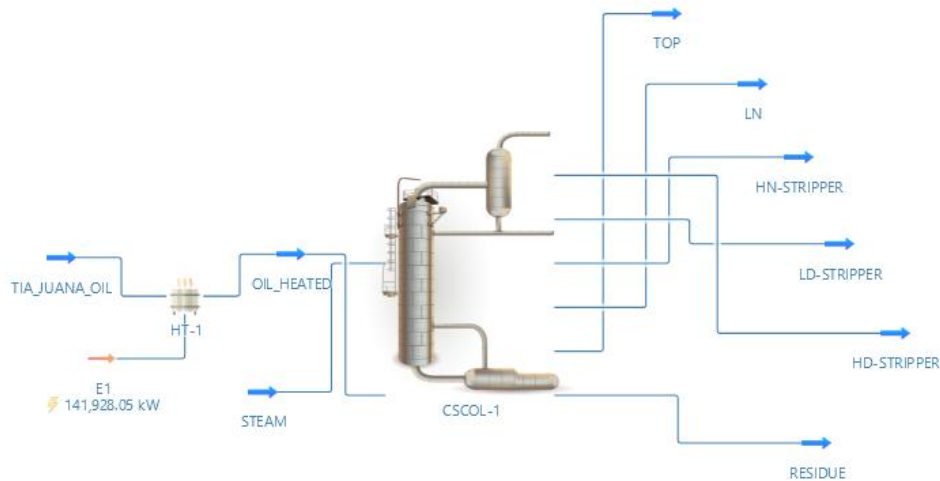


Ilustración 3-22: Flowsheet inicial de la CDU (sin side-strippers).

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Para completar la CDU añadiremos los side-strippers que harán que se obtenga una mayor eficiencia en el proceso obteniendo un mejor producto con la ayuda de un retorno a la torre de fraccionamiento por parte de los side-strippers. La adición de los side-strippers y el retorno de estos a la torre no se puede hacer al mismo tiempo, por ende, solo se implementa los side-strippers a las corrientes correspondientes junto con sus parámetros de operación lo cual se indica en la tabla 3-2 y teniendo en cuenta que la alimentación de lo extraído en todos los side-strippers se hace por la etapa 1 y en el side-stripper de HD el agua como vapor se ingresa por la etapa 5. En la ilustración 3-23 se presenta la cantidad de producto por parte del Side-stripper de HN, esto para que se resuelva la columna y he aquí la razón de la recirculación, permitiendo obtener mayor producto. En la ilustración 3-24 se muestra el flowsheet con los side-strippers, pero sin los retornos desde estos.

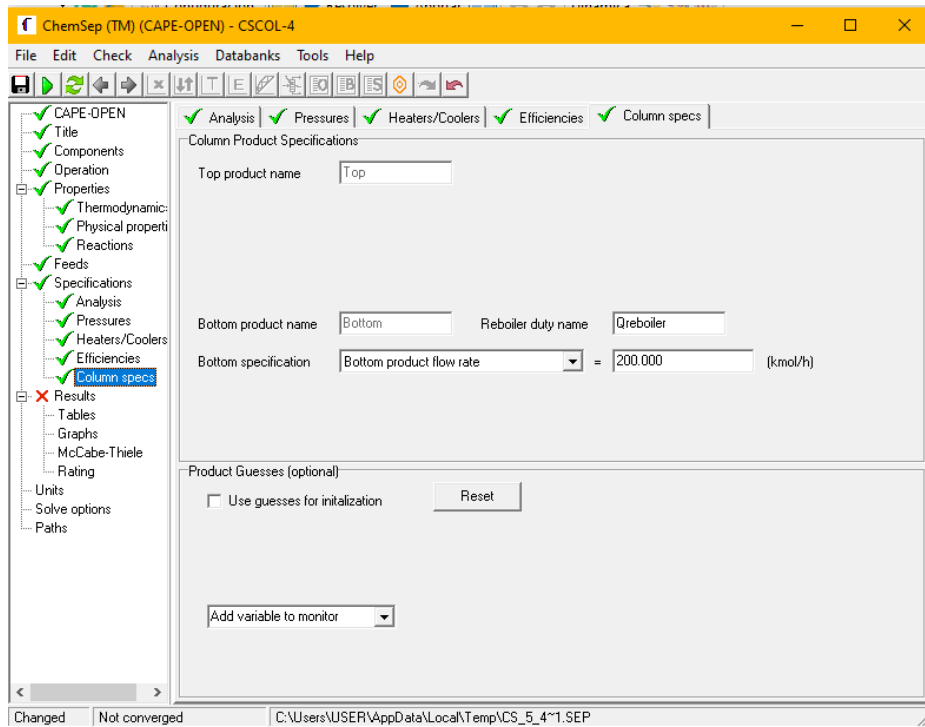


Ilustración 3-23: Side-stripper de HN antes de la recirculación.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

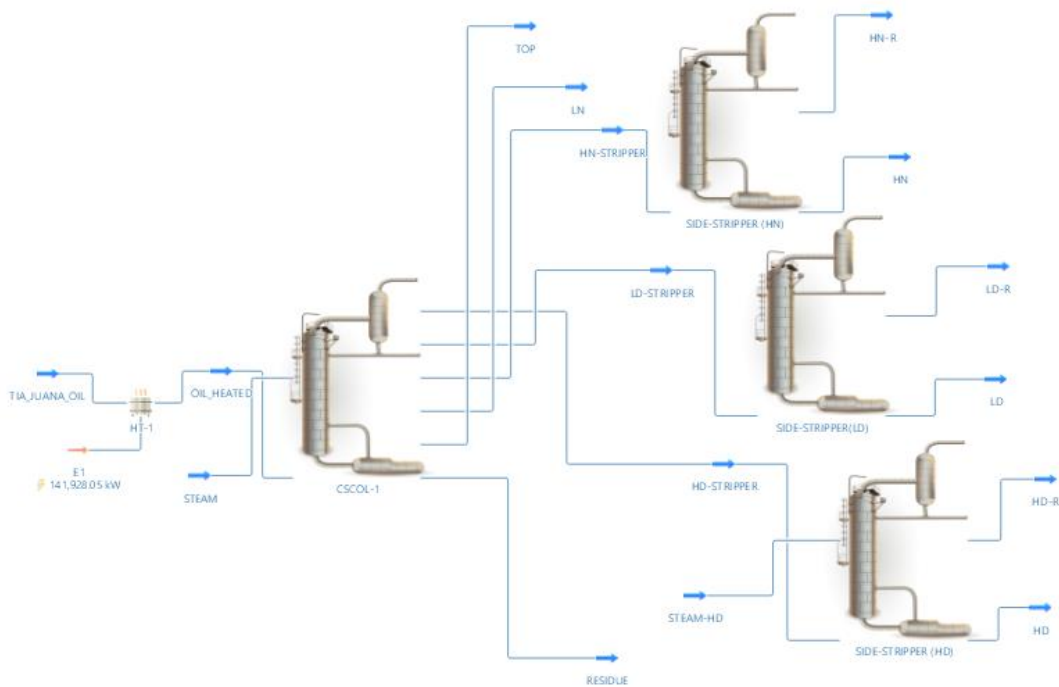


Ilustración 3-24: Flowsheet de la Unidad de Destilación de Crudo sin retornos.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Ahora realizamos las recirculaciones de los Side-strippers ya que el retorno a la torre de fraccionamiento “CSCOL-1” es lo que buscamos. Los retornos están nombrados como HN-R, LD-R y HD-R siendo estos la entrada para el bloque de recirculación que es un bloque lógico que el programa nos otorga como herramienta y como salidas del bloque tenemos HN-RETRAY, LD-RETRAY y HD-RETRAY que serán los retornos como tal a la torre. En la ilustración 3-25 se presenta las recirculaciones añadidas al flowsheet sin conectarlas aún a la torre de fraccionamiento principal ya que es necesario cambiar unos parámetros de diseño y condiciones de operación en esta.

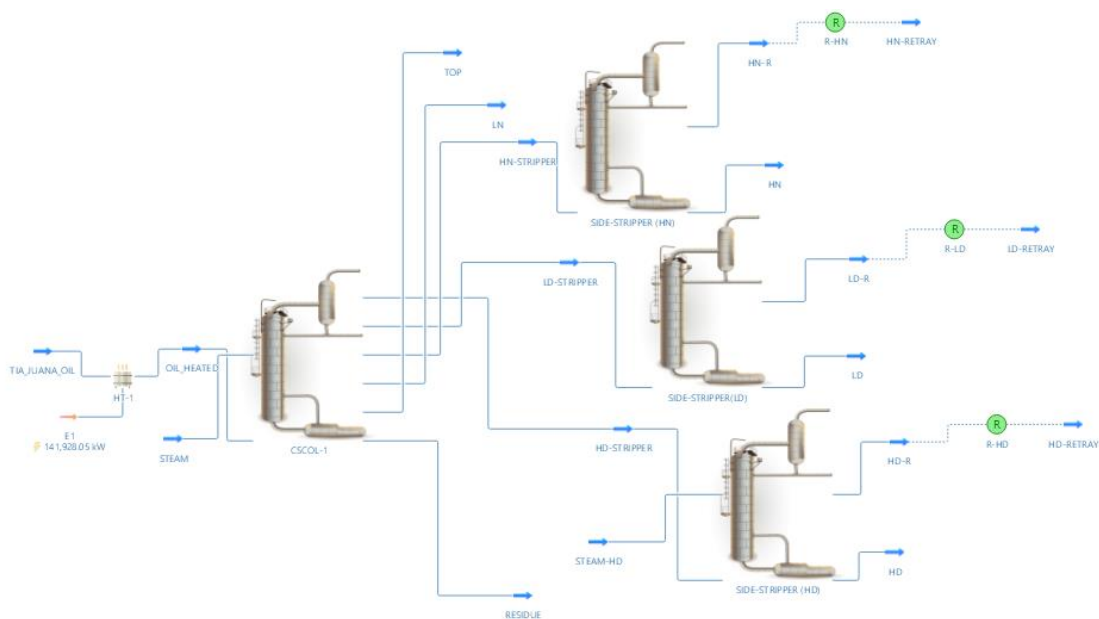


Ilustración 3-25: Flowsheet de la Unidad de Destilación de Crudo con bloques lógicos de recirculación

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Con los bloques de recirculación añadidos y trabajando correctamente procedemos a añadir los retornos a la torre de fraccionamiento lo cual se observa en la ilustración 3-26 donde ponemos los valores de diseño que están en la tabla 3-2. En los sidestreams y en la cantidad de producto en el HN-STRIPPER colocamos los valores que tenemos en la tabla 3-3. Como último punto agregamos un Cooler en LN para que el producto tenga una fracción de vapor de 0.00120315 como se observa en la ilustración 3-27.

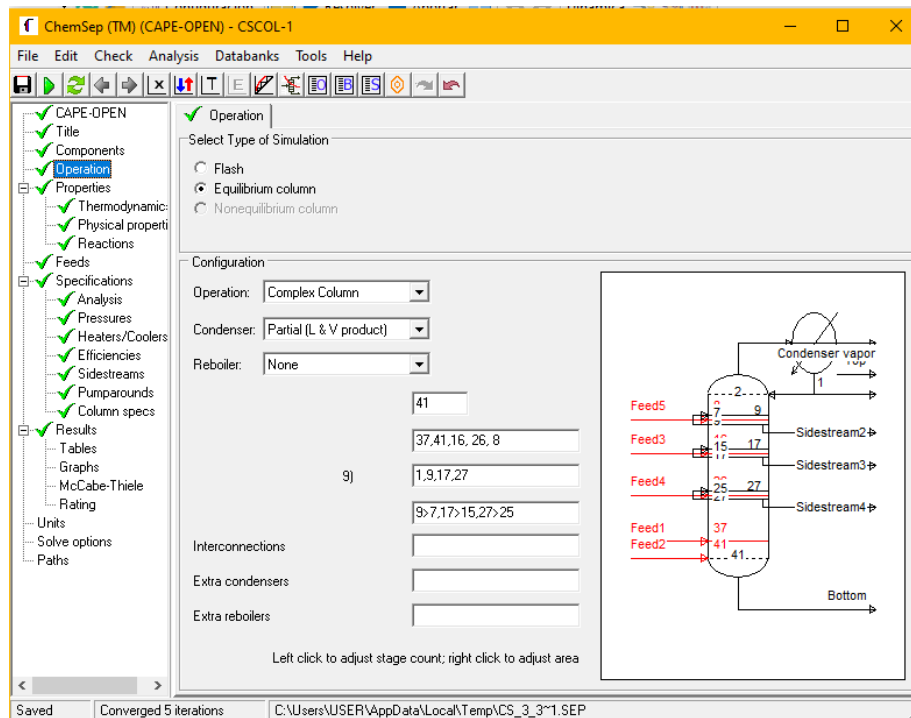


Ilustración 3-26: Diseño final de la CSCOL-1.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

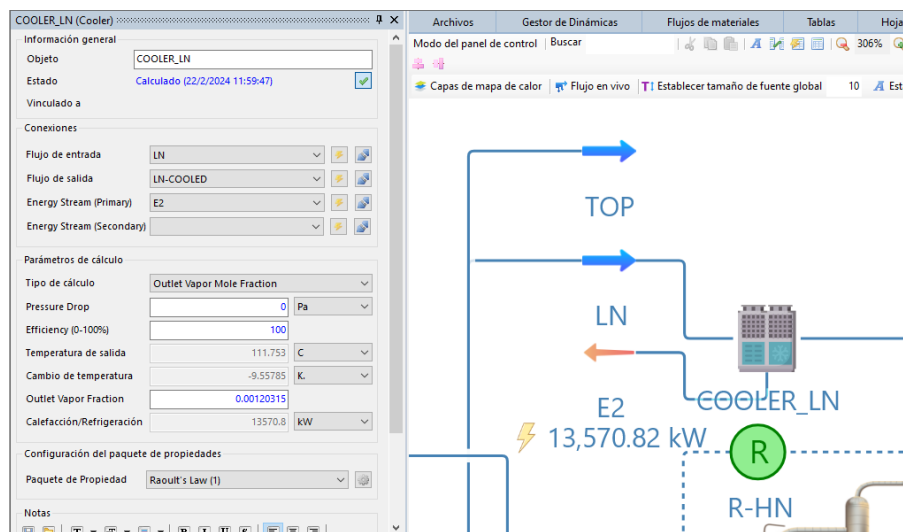


Ilustración 3-27: Cooler para enfriamiento de LN.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.5. Validación de la simulación

Para validar la simulación se toman como referencia los resultados presentados en el artículo científico del cual nos hemos basado para la simulación, comparando así los resultados que nos dé el flowsheet que hemos hecho en DWSIM con los resultados que proporcione Aspen HYSYS® o Aspen Plus, esto se lo puede revisar en la tabla 4-2 la cual compara los valores de estos programas para saber la proximidad que hay entre estos

presentando así el error, de esta manera comprobando la confiabilidad de los resultados de DWSIM y la validación de la simulación lo cual nos indica que el flowsheet es funcional y está correctamente elaborado.

Para una mayor facilidad de visualización de los resultados en DWSIM usaremos la herramienta de “Tabla maestra de propiedades” y seleccionando las propiedades de nuestro interés que sería los flujos volumétricos (m³/h) de las corrientes LN-COOLED, HN, LD, HD y RESIDUE como se observa en la ilustración 3-28. En la ilustración 3-29 se presenta el flowsheet del proceso final y de la Unidad de Destilación de Crudo (CDU) completa.

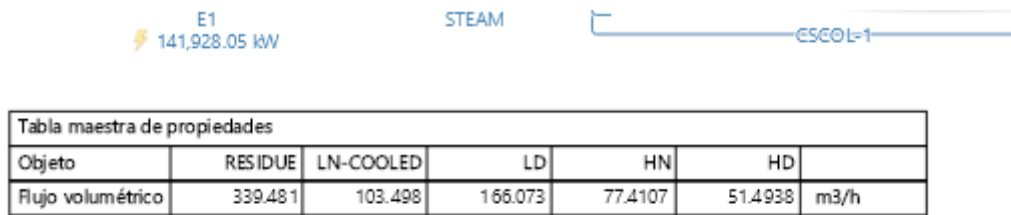


Ilustración 3-28: Tabla de propiedades maestra para la Unidad de Destilación de Crudo (CDU).

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

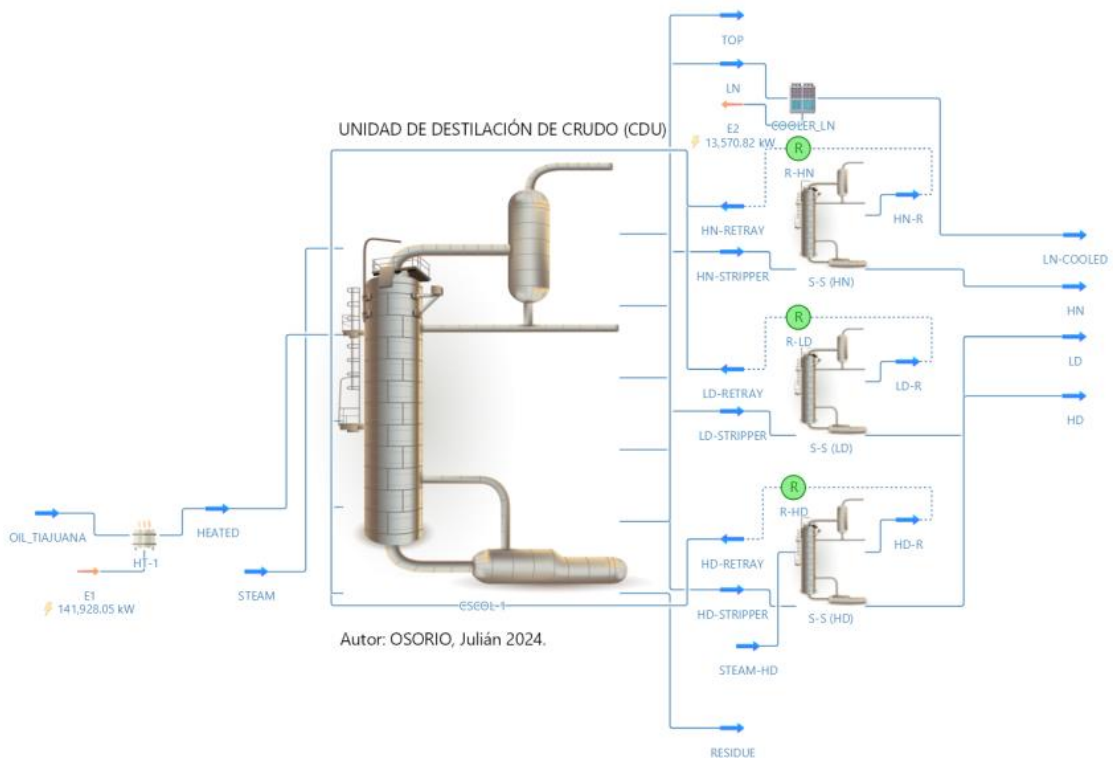


Ilustración 3-29: Unidad de Destilación de Crudo en DWSIM.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.6. Tratamiento de datos (Creación de base de datos)

Después de haber realizado la simulación y validado los datos de esta, procedemos a la creación de la base de datos que es la parte más importante para posteriormente diseñar y entrenar la red neuronal que será la encargada de predecir los resultados en base a variaciones que hagamos en parámetros que modifiquen al proceso como tal, a esto nos referimos variables de entrada más no en el diseño de la torre de fraccionamiento. Para el tratamiento de datos escogeremos cuales serán nuestras variables de entrada y las variables de salida importantes para nosotros en el proceso y después de escogidas las variables, realizaremos varias simulaciones cambiando las variables de entrada y así obteniendo resultados variados los cuales se usarán para diseñar la red neuronal. Para el caso de esta Unidad de Destilación de Crudo (CDU) hemos escogido estas variables de entrada y salida generando así la base de datos necesaria para la Red. La variable que se presenta en la tabla 3-5 se la ingresa usando la herramienta de “Caracterización del petróleo (curvas de destilación)” al momento de caracterizar al crudo mediante la curva de destilación TBP.

Tabla 3-5: Variable de entrada para la RNA

ENTRADAS	
Parámetro	Temperatura a la que hay % VAP en el crudo
Detalles	°C
Identificación	Temperatura (C)

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Aleatorizando los valores de entrada de manera lógica y no con valores desproporcionales a los reales consultados en bibliografía se procede a ingresarlos en el simulador para obtener nuestros resultados en base a los datos de entrada ingresados, identificando así las variables de salida de importancia que se presentan en la tabla 3-6.

Tabla 3-6: Variables de salida para la RNA.

SALIDAS					
Parámetro	Flujo Volumétrico (m ³ /h)				
Identificación	LN-COOLED	HN	LD	HD	RESIDUE

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Para el levantamiento de la base de datos es importante tener en cuenta los puntos de recirculación, por ende, se seguirán las mismas instrucciones usadas para la creación del flowsheet de la Unidad de Destilación de Crudo ya que si no se lo hace los valores de salida requeridos y de recirculación no permitirán que los balances de masa se calculen correctamente y por ende no convergerá el programa. En el Anexo A se presenta una tabla con un total de 350 datos donde se tienen 10 datos de entrada y 5 datos de salida, 325 datos serán usados para el diseño y entrenamiento de la red mientras que los 25 restantes se usarán para la validación de esta.

3.7. Diseño de la RNA (Red Neuronal Artificial) en Matlab

En primera instancia se identifican las variables de entrada y salida para la creación de la red neuronal lo cual se describe en las tablas 3-5 y 3-6. Con la base de datos ya creada procedemos a ingresarla en el programa de Matlab en forma de matrices lo cual facilitará el procesamiento de los datos y el código se encuentra en el Anexo C. Es importante que al ingresar los datos en Matlab, hacerlo con la función de normalización ya que esto permitirá tanto a las entradas como a las salidas estar entre valores de 0 y 1, esto ayudará a la red a tener un mejor aprendizaje y predicción teniendo así un error muy bajo entre lo predicho y lo real, también es importante considerar la fórmula de normalización ya que es necesario los valores máximos y mínimos de los valores de salida para la predicción transformarla desde un valor normalizado.

%VAP										Flujo volumétrico (m3/h)				
0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	LN-COOLED	HN	LD	HD	RESIDUE
Temperatura (C)														
44	50	95	143	228	289	333	383	455	499	116.003	57.7841	175.079	57.1598	323.635
36	63	108	162	207	278	322	363	458	529	104.611	86.4991	178.569	55.2682	316.517
41	60	94	157	226	244	315	379	464	540	106.54	81.787	173.397	50.4225	325.766
35	93	95	159	223	274	340	367	410	542	102.473	95.751	184.278	61.4891	301.826
41	58	123	159	229	254	320	361	446	533	102.26	100.536	183.506	54.1695	307.753
42	62	95	148	220	275	323	376	443	531	110.115	71.9441	175.9441	55.7145	322.117
36	72	113	160	205	261	341	381	468	507	101.562	94.5701	170.721	53.7682	321.245
36	75	83	162	228	250	322	368	466	559	106.593	78.8705	176.61	52.7704	322.698
44	56	106	155	223	265	308	381	443	519	105.549	86.8618	178.107	53.093	318.649
42	90	116	140	208	272	338	386	428	509	102.2	92.6749	170.432	58.6795	312.88
37	57	108	147	215	250	326	372	426	499	105.642	93.5475	172.669	53.424	314.144
40	54	120	165	218	289	330	362	422	555	102.413	94.5621	188.166	59.428	306.179
38	82	101	160	208	280	350	377	411	519	102.814	94.7707	179.559	61.1949	306.394
38	62	101	162	230	252	305	389	466	491	107.895	97.3525	177.327	49.6356	305.24
41	82	109	147	216	251	345	385	413	542	102.946	98.2054	171.24	57.152	311.016
44	71	122	143	214	255	306	379	446	530	103.462	97.7364	172.01	52.8097	313.176
40	88	124	143	205	260	335	361	448	501	102.742	93.9304	171.512	56.2633	308.244
37	62	97	150	205	289	318	365	457	530	112.443	66.7794	173.992	56.2737	320.937
45	56	106	146	215	245	306	360	444	539	107.701	88.488	171.663	50.6966	317.491

Ilustración 3-30: Base de datos a ingresar en Matlab.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Ya ingresados los datos como matrices en Matlab y normalizados, procedemos a hacer uso de la herramienta “Neural Net Fitting” en la sección de APPS la cual nos permite la creación y entrenamiento de una red neuronal a partir de datos ingresados como variables y estos como matrices en Matlab. En la ilustración 3-31 se observa el ingreso de las matrices de entrada y de salida seleccionando la opción de “Matriz rows” ya que es como disponemos la base de datos.

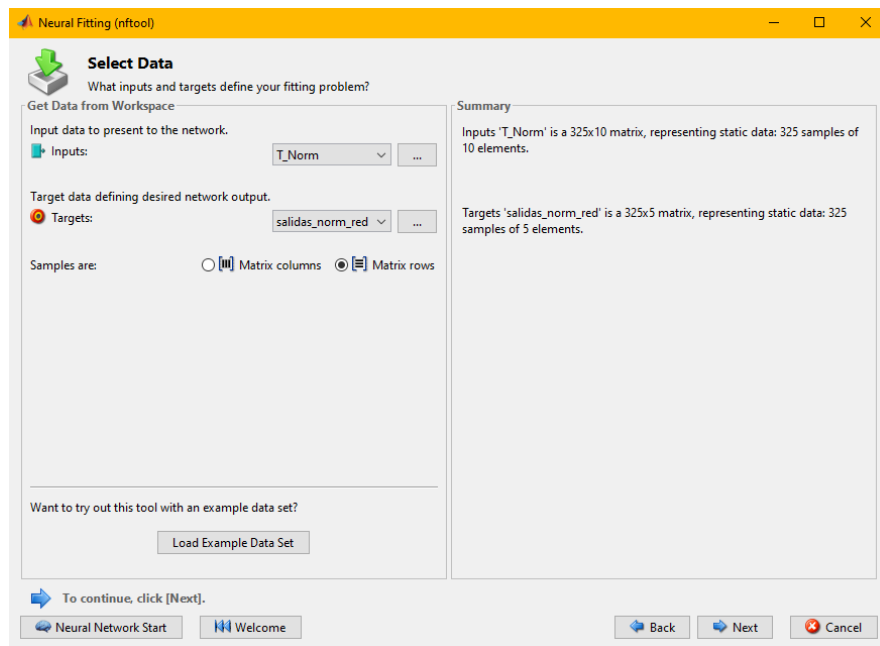


Ilustración 3-31: Ingreso de las entradas y salidas en la herramienta “Neural Net Fitting” de Matlab.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.8. Entrenamiento y aprendizaje de la RNA

Después de ingresar las entradas y salidas configuraremos la RNA lo cual implica la selección apropiada de un algoritmo matemático, ajustando el número de capas ocultas dentro de un rango de 10 a 100 con incrementos de 10 unidades, y la distribución de los 325 datos destinados a las etapas de entrenamiento de la red. Esta distribución se lleva a cabo asignando el 70% de los datos para el entrenamiento (227 datos), el 15% para la validación (49 datos) y otro 15% para la fase de prueba (49 datos), como se muestra en la ilustración 3-32. En la ilustración 3-33 se detalla los algoritmos matemáticos para entrenar la red los cuales son tres: Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization y Scaled Conjugate Gradiente, en la tabla 4-3 se muestra las variaciones que se hicieron en las

neuronas ocultas y los valores de MSE y R, buscando el valor de MSE más aproximado a 0 y R con el valor que se acerque más a la unidad.

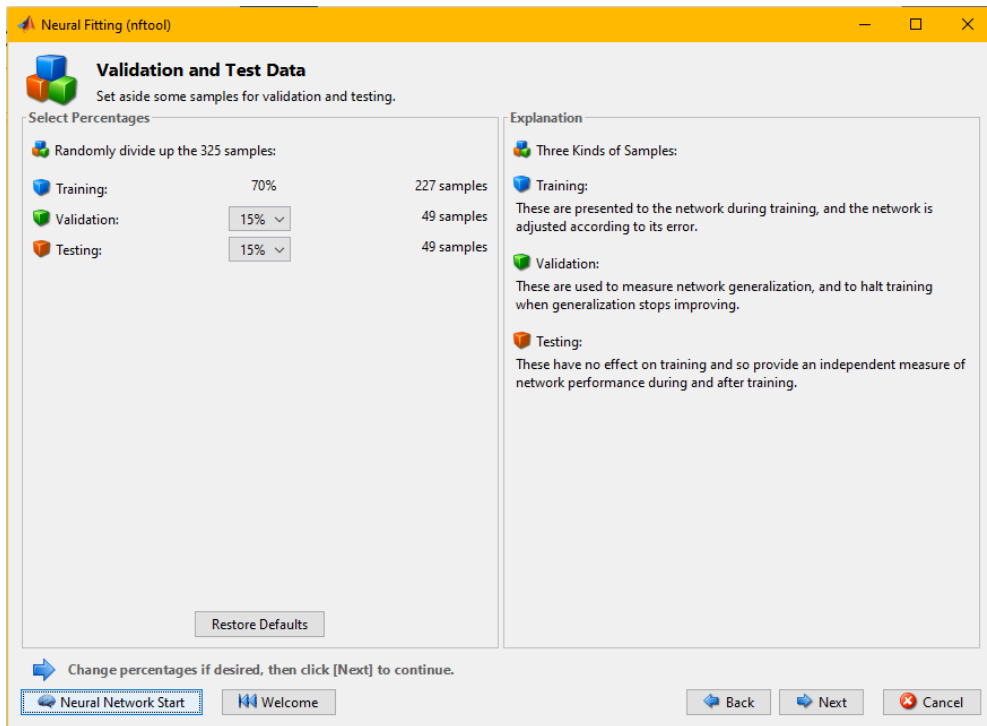


Ilustración 3-32: Distribución de datos para el entrenamiento, validación y testeo de la red neuronal.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

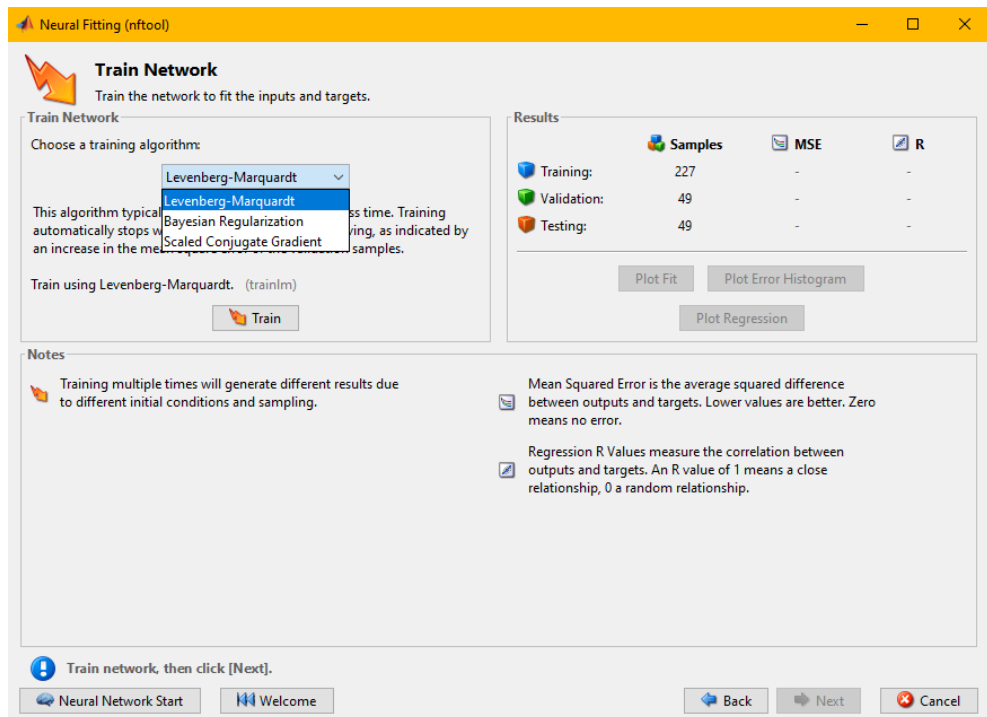


Ilustración 3-33: Algoritmos matemáticos disponibles para el entrenamiento de la red neuronal.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

3.9. Análisis estadístico

Luego de completar la validación externa de la Red Neuronal Artificial (RNA), se lleva a cabo un análisis estadístico mediante la comparación de los flujos volumétricos (m³/h) de LN, HN, LD, HD y RESIDUE obtenidas por el simulador y las estimadas por la red neuronal. Este procedimiento se realiza utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion 19, el cual emplea la prueba ANOVA para analizar los resultados.

ANOVA: El análisis de varianza de un factor es una prueba estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre más de dos grupos en términos de sus medias y varianzas. En este análisis, se compara una variable independiente categórica (nominal o de razón) con una variable dependiente que tiene un nivel de medición de intervalo o razón (Juárez Lugo 2015). Resulta provechoso en situaciones donde se requiere comparar más de dos grupos, cuando se realizan mediciones repetidas en más de dos ocasiones, y cuando los sujetos presentan variabilidad en una o más características que pueden incidir en el resultado (Jorge Dagnino 2014).

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

4.1. Resultados de la simulación en DWSIM

La simulación del proceso de fraccionamiento de crudo en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) se realizó en el programa de código abierto DWSIM teniendo en cuenta las ventajas, funciones y herramientas que este ofrecen a comparación de otros softwares e incluso se acerca y es muy similar al programa Aspen HYSYS ® o Aspen Plus en cuestión de uso. En DWSIM se armó una CDU ya que este no cuenta con el equipo como tal a diferencia los programas de los que nos estamos basando, Aspen HYSYS ® o Aspen Plus.

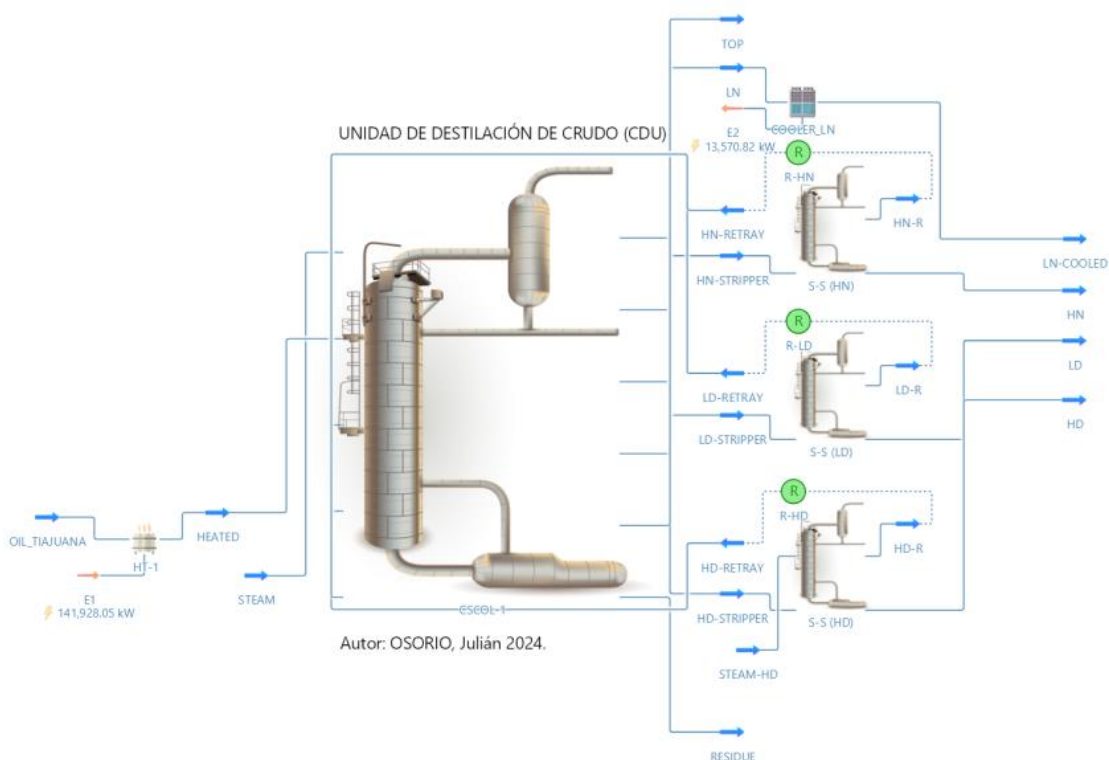
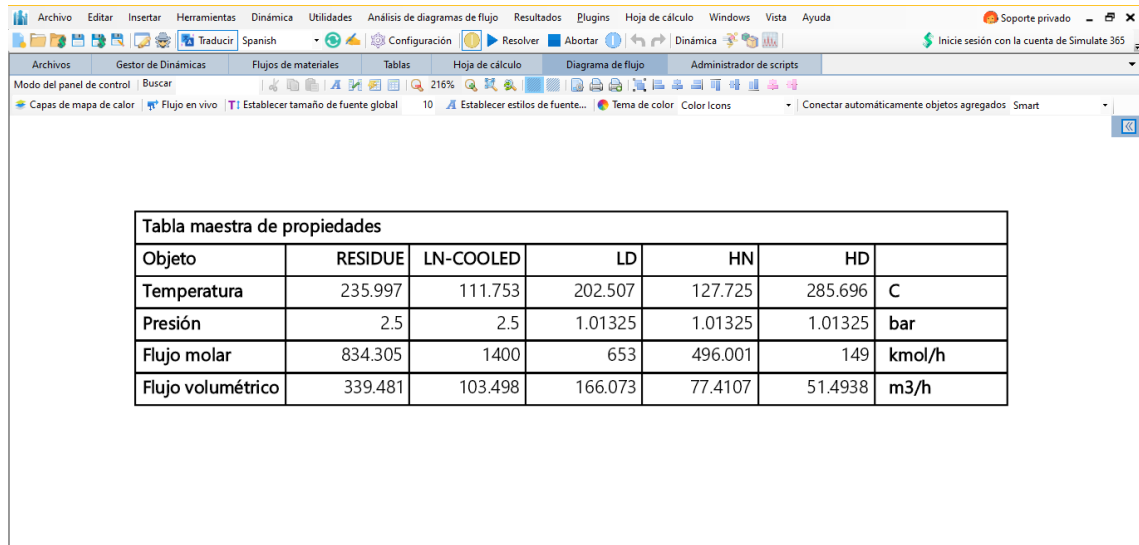


Ilustración 4-1: Simulación final del fraccionamiento de crudo en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU).

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En nuestro caso al simulador la torre de fraccionamiento junto con los Side-strippers teníamos un retorno por parte de estos, la simulación se la hizo con la ayuda de bloques lógicos de recirculación o de reciclaje lo cual permitía este retorno sin un cálculo o bucle infinito y como las recirculaciones se hacían al mismo tiempo no existía problema en correr una por una si no todas de corrido, lo único fue el cambiar valores como se explica

en el capítulo 3 ya que las cantidades que entran tenían que distribuirse de manera correcta para tener las salidas deseadas, que el programa y torre funcione y los balances de masa se calculen correctamente.



The screenshot shows the DWSIM software interface with a table titled "Tabla maestra de propiedades" (Master Properties Table). The table contains the following data:

Objeto	RESIDUE	LN-COOLED	LD	HN	HD	
Temperatura	235.997	111.753	202.507	127.725	285.696	C
Presión	2.5	2.5	1.01325	1.01325	1.01325	bar
Flujo molar	834.305	1400	653	496.001	149	kmol/h
Flujo volumétrico	339.481	103.498	166.073	77.4107	51.4938	m3/h

Ilustración 4-2: Resultados de la simulación en la interfaz de DWSIM.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

En la tabla 4-1 se presentan los resultados de los flujos volumétricos (m^3/h) de la simulación en DWSIM de Light Naphtha (LN), Heavy Naphtha (HN), Light Distillate (LD), Heavy Distillate (HD) y RESIDUE los cuáles son lo que nos interesan a saber en el proceso y para la verificación y comparación de estos resultados con artículos de alto impacto.

Tabla 4-1: Flujos Volumétricos obtenidos en DWSIM.

Objeto	Flujo Volumétrico (m^3/h)
LN-COOLED	103.498
HN	77.4107
LD	166.073
HD	51.4938
RESIDUE	339.481

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

4.2. Verificación de los resultados de la simulación

Para la verificación y validación de los resultados y la simulación tomamos los valores del artículo del cual nos hemos basado que en este caso de estudio ha sido de Ibrahim et al., (2021). En el artículo se presentan flujos volumétricos (m^3/h) de las corrientes LN, HN, LD, HD y RES del crudo "Tia Juana light" que es el que nosotros hemos ingresado al

simulador. Para la validación se usa calcula el error porcentual usando la (Ec-1) comparando los valores por el simulador DWSIM (V_{DWSIM}) y los valores del artículo que son de Aspen HYSYS ® (V_{ASPEN}).

$$Error\ porcentual = \left| \frac{V_{ASPEN} - V_{DWSIM}}{V_{ASPEN}} \right| \times 100 \quad (\text{Ec- 1})$$

Tabla 4-2: Verificación y validación de la simulación en DWSIM.

Objeto	Unidades	DWSIM	Ibrahim et al., (2021).	Error (%)
LN	m ³ /h	103.498	103.5	0.002
HN		77.4107	78.2	1.009
LD		166.073	140.3	18.370
HD		51.4938	48.1	7.056
RESIDUE		339.481	292.5	16.062
Error Porcentual Promedio				8.500

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

De acuerdo con bibliografía para validar la simulación de DWSIM respecto a otros softwares como Aspen HYSYS ® el porcentaje de Error porcentual debe ser 8% o menor, sin embargo, se ha considerado que no supere el 10% para la validación lo cual se cumple obteniendo un total de 8.5% validando de esta manera la simulación para uso posterior en el levantamiento de la base de datos, diseño y entrenamiento de la Red Neuronal Artificial (RNA). El error que se obtiene se debe a que Aspen HYSYS ® y DWSIM simulan los hidrocarburos de una manera un poco diferente debido a los paquetes o modelos termodinámicos, sus herramientas y los equipos, como ya mencioné en Aspen ya cuenta con la Unidad de Destilación de Crudo (CDU) y variaciones de esta mientras que en DWSIM tuve que armar el equipo por mi cuenta haciendo que se acerque en lo más posible al de Aspen e incluso considerando esto el valor del error porcentual de todo el proceso no supera el valor de 9% lo cual me indica que se puede simular el proceso tanto Aspen como en DWSIM sin una variación tan alta para el proceso de fraccionamiento de crudo específicamente. Incluso la manera en que los programas simulen las propiedades del crudo es crucial ya que como observamos en las curvas de destilación y sus pseudocomponentes, una variación mínima da como resultado cambios evidentes en el

proceso, es por esto que se ha tomado a la curva de destilación como un parámetro a variar para crear la base de datos y tomar esta variable como entrada en la Red Neuronal.

4.3. Resultados del entrenamiento de la RNA

El entrenamiento de la red neuronal artificial fue llevado a cabo utilizando los algoritmos de aprendizaje proporcionados por MATLAB, según se detalla en el Anexo C del código de programación. Para diseñar la red, se exploraron diferentes configuraciones con un rango de 10 a 100 redes ocultas. Cada configuración fue evaluada mediante la prueba del error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de regresión lineal (R) buscando el valor más próximo a 0 de MSE y el valor que más se acercara a 1 en R. Dependiendo del algoritmo utilizado, LM (Levenberg-Marquart) y SCG (Scale Conjugate Gradient), se consideraba el valor de validación, mientras que para BR (Bayesian Regularization) se utilizaba el valor de prueba, dado que este último no disponía de valores de validación como los anteriores. Los resultados se muestran en la Tabla 4-3. Es relevante destacar que la elección del algoritmo y el número de neuronas ocultas se especifica en las líneas 49 y 52 del código de programación.

Tabla 4-3: Resultados de MSE y R en el entrenamiento de la RNA en MATLAB.

Hidden Neurons		MÉTODO					
		Levenberg-Marquardt		Bayesian Regularization		Scaled Conjugate Gradient	
		MSE	R	MSE	R	MSE	R
10	Training	0.0007545	0.99199	0.000266122	0.997154	0.00259664	0.973021
	Validation	0.00174164	0.983147	0	0	0.00288416	0.970158
	Testing	0.00163001	0.983386	0.000975633	0.991623	0.00324937	0.93772
20	Training	0.000105618	0.9989	0.000099346	0.998963	0.00144	0.984917
	Validation	0.000882196	0.990603	0	0	0.0020983	0.979677
	Testing	0.000525274	0.994996	0.000141952	0.998612	0.00159602	0.982435
30	Training	0.000098718	0.998987	4.24432E-05	0.999562	0.00262698	0.97339
	Validation	0.00105302	0.989001	0	0	0.00465794	0.950537
	Testing	0.000825383	0.991074	0.000825888	0.991211	0.00595646	0.927194
40	Training	0.000588348	0.993994	1.47781E-05	0.999845	0.00195594	0.979414
	Validation	0.00312597	0.96675	0	0	0.00585567	0.938617
	Testing	0.00278509	0.9699	0.00183808	0.981746	0.00456556	0.952564
50	Training	0.000090972	0.999051	7.41986E-06	0.999923	0.00168837	0.982413
	Validation	0.0017661	0.981753	0	0	0.00500501	0.947479
	Testing	0.00169127	0.983886	0.00162382	0.983239	0.00389202	0.959886
60	Training	0.000337096	0.996581	1.94767E-06	0.999979	0.00110646	0.988611

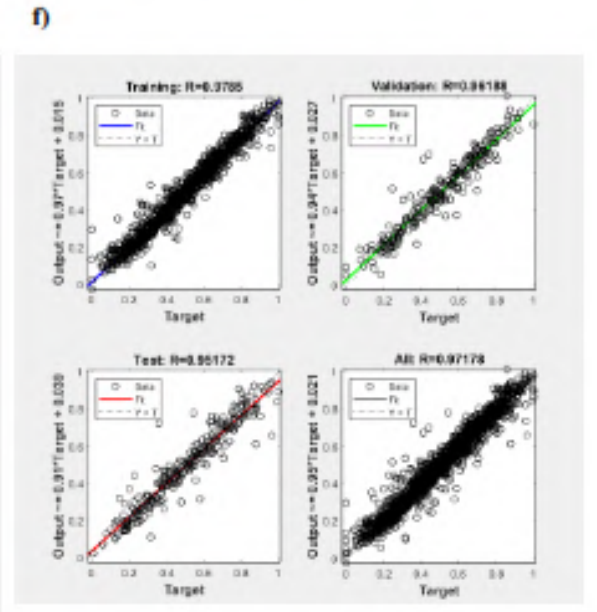
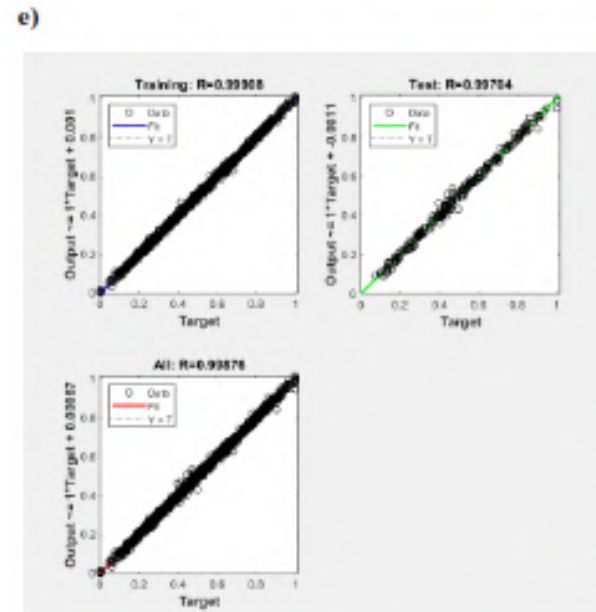
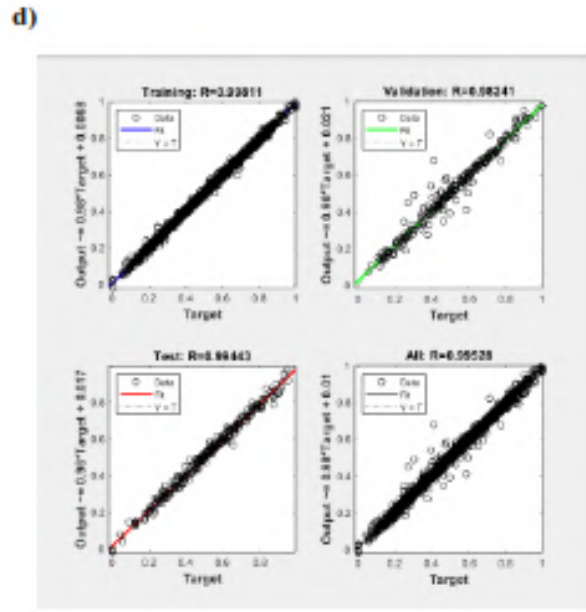
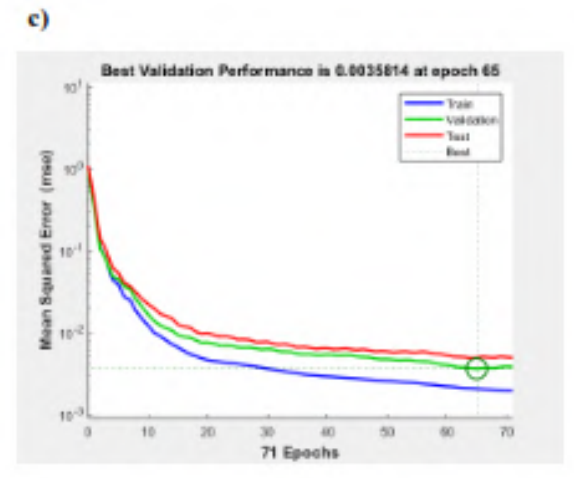
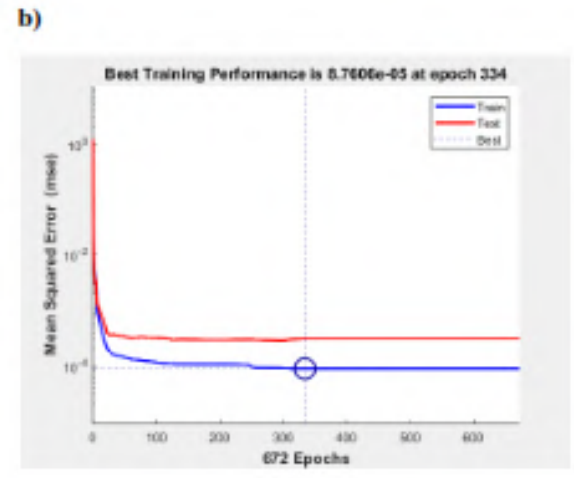
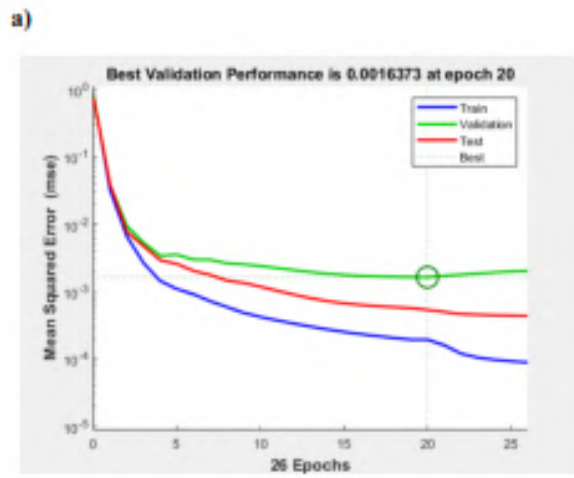
	Validation	0.00511669	0.942949	0	0	0.00607615	0.939562
	Testing	0.00620681	0.933375	0.00107686	0.98939	0.00542428	0.938945
70	Training	4.35312E-05	0.999559	8.18878E-07	0.999991	0.00107794	0.988824
	Validation	0.00480851	0.953937	0	0	0.00593598	0.938765
	Testing	0.00540986	0.943647	0.00151337	0.984402	0.00628308	0.938397
80	Training	0.000526762	0.994996	8.21186E-08	0.999999	0.000373858	0.996223
	Validation	0.00807708	0.906204	0	0	0.00479935	0.941095
	Testing	0.00597274	0.939783	0.00186294	0.982692	0.00318433	0.966796
90	Training	5.65796E-05	0.999393	1.11081E-12	0.999999	0.000473739	0.995141
	Validation	0.00620126	0.944647	0	0	0.00694506	0.929426
	Testing	0.00832909	0.927794	0.000745359	0.992785	0.00563107	0.941579
100	Training	0.00111235	0.989843	1.07131E-12	0.999999	0.000106344	0.998914
	Validation	0.0105625	0.903692	0	0	0.0102181	0.885437
	Testing	0.0104682	0.894871	0.0014535	0.985647	0.00894679	0.918273

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Al finalizar el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial (RNA) con los tres algoritmos que MATLAB ofrece se pudo identificar que para LM la configuración óptima fue de 20 neuronas ocultas (MSE=0.0008821 y R=0.990603), en BR la mejor configuración fue en 20 neuronas ocultas (MSE=0.0001419 y R=0.998612) y para SCG se estableció que 20 neuronas ocultas fue lo óptimo (MSE=0.0020983 y R=0.979677).

En la ilustración 4-3 se muestran los gráficos de los errores de entrenamiento, validación y prueba para los algoritmos LM (4-3 a), BR (4-3 b) y SCG (4-3 c). Se observa que el algoritmo de entrenamiento finaliza cuando supera el error máximo en cada iteración, y este error disminuye a medida que aumentan los entrenamientos. Las gráficas de regresión se presentan en los apartados d, e y f de la ilustración 4-3, donde se describe la cercanía entre las salidas de la red y los objetivos establecidos por las muestras de entrenamiento, validación y prueba. El mejor ajuste entre las salidas y los objetivos se lograría cuando la proximidad alcanza un valor de R=1.

Tras comparar los resultados obtenidos por los diferentes modelos de entrenamiento, se optó por seleccionar la Red Neuronal Artificial (RNA) diseñada con el algoritmo BR, dado su rendimiento superior y la eficacia de sus salidas. Además, se procedió a evaluar su capacidad predictiva mediante una validación externa y análisis estadísticos, con el propósito de obtener predicciones fiables.



Levenberg-Marquardt

Bayesian Regularization

Scaled Conjugate Gradient

Ilustración 4-3: Entrenamiento de la RNA con los tres algoritmos que dispone MATLAB.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024

4.4. Resultados del diseño de la RNA

Tras confirmar que el algoritmo Bayesian Regularization (BR) ofrece una mayor eficacia y cercanía durante el proceso de entrenamiento de la red neuronal, se llevó a cabo un último entrenamiento utilizando el mismo algoritmo. En este entrenamiento, se consideró una red neuronal con 20 neuronas ocultas y una base de datos compuesta por 325 valores, con 10 entradas y 5 salidas como se observa en la ilustración 4-4.

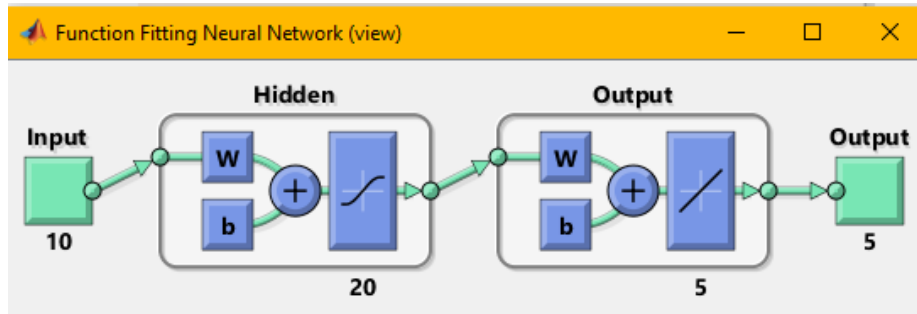


Ilustración 4-4: Estructura de la RNA diseñada en MATLAB.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Los errores cuadráticos derivados del ajuste de datos en las fases de entrenamiento y prueba se encuentran especificados en la tabla 4-4. Cuando se obtienen valores de Error Cuadrático Medio (MSE) cercanos a cero, se puede afirmar que estos errores poseen una tolerancia suficiente para garantizar una ejecución adecuada de la red neuronal.

Tabla 4-4: Error Cuadrático Medio (MSE) del entrenamiento final de la RNA.

Etapa	MSE
Adiestramiento (trainPerformance)	7.7695 E-05
Prueba (testPerformance)	2.6904 E-04
Desempeño (performance)	1.0654 E-04

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

4.4.1. Rendimiento de la RNA

El desempeño de la red neuronal se representa a través de las ilustraciones 4-5 y 4-6. En la primera ilustración, se visualiza la disminución del Error Cuadrático Medio (MSE) en cada etapa del entrenamiento a medida que aumentan las iteraciones. Se observa que el mejor MSE alcanzado (7.7695 E-05) ocurrió en la etapa de entrenamiento durante la iteración 225. En la segunda ilustración, se muestra una correlación lineal entre las entradas de la red y sus objetivos, con un coeficiente de regresión (R) total de 0.9989.

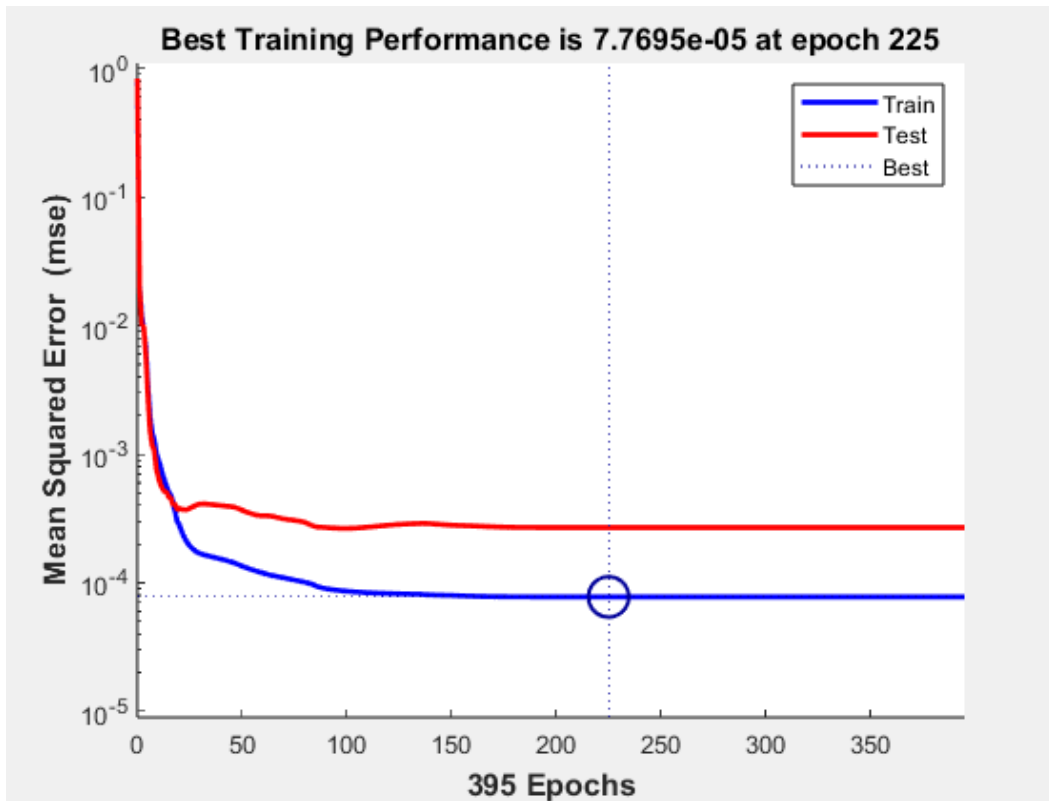


Ilustración 4-5: Disminución del MSE durante el adiestramiento de la RNA.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

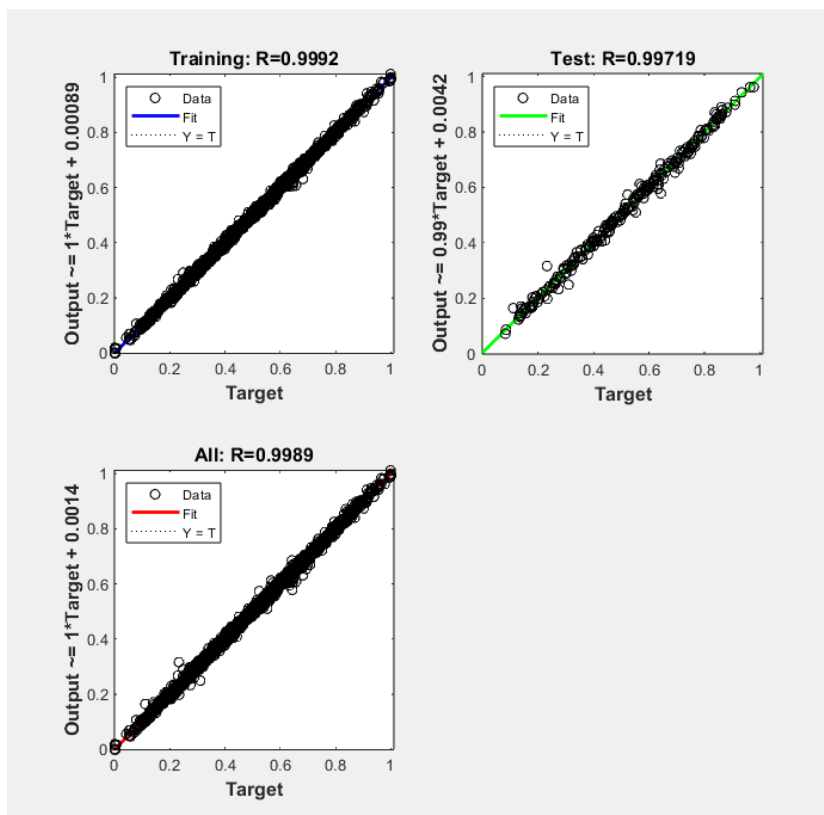


Ilustración 4-6: Correlación lineal entre las entradas y salidas de la RNA.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

4.5. Resultados obtenidos con la predicción de la RNA

Después de haber diseñado y entrenado la red neuronal, las salidas que estas da como resultados predichos se los comparó con los resultados que da el programa DWSIM cuantificando esta comparación con el cálculo del error porcentual con la (Ec-1) haciendo un cambio, en vez de V_{ASPEN} sería V_{DWSIM} y V_{DWSIM} cambiaría por $V_{PREDICHO}$. En el Anexo D se detallan los errores porcentuales en la predicción durante el adiestramiento de la red y en el Anexo E se encuentran los errores en la etapa de validación externa. En la comparación de los errores porcentuales entre la fase de adiestramiento y validación externa se determinó que los errores son mayores en la etapa de validación, esto se debe al valor de testPerformance (2.6904 E-04) y trainPerformance (7.7695 E-05) donde analizando estos valores resulta que el segundo es menor al primero, a pesar de esto se obtuvo un error porcentual promedio en las entradas de 0.66, 2.23, 0.57, 0.68 y 0.49 lo cual resulta ser más que aceptable para concluir que se puede confiar en la predicción de la RNA.

4.5.1. Estudio de las predicciones de la RNA

Para este estudio se elaboraron gráficas comparativas entre los valores reales determinados por DWSIM (reales) y aquellos predichos por la RNA (predichos) con el fin de tener una mejor comprensión de los resultados. Este proceso se dividió en dos, la fase de entrenamiento que se hizo uso de 325 datos y la fase de validación externa que se usó 25 datos.

4.5.1.1. Datos predichos en el adiestramiento

Flujo volumétrico (m^3/h) de Light Naphtha (LN)

El flujo volumétrico de Light Naphtha (LN) durante el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial tuvo un error porcentual promedio de 0.1482 comparando los valores reales o experimentales (DWSIM) con los predichos (RNA), este valor es bajo debido a que en la fase de entrenamiento la Red Neuronal presenta un valor muy acercado a cero (7.7695 E-05) lo cual se ve reflejado en la ilustración 4-7, esta muestra que los valores reales van muy a la par con los valores predichos por la Red lo cual es un resultado positivo, siendo así confiable para la predicción de este parámetro.

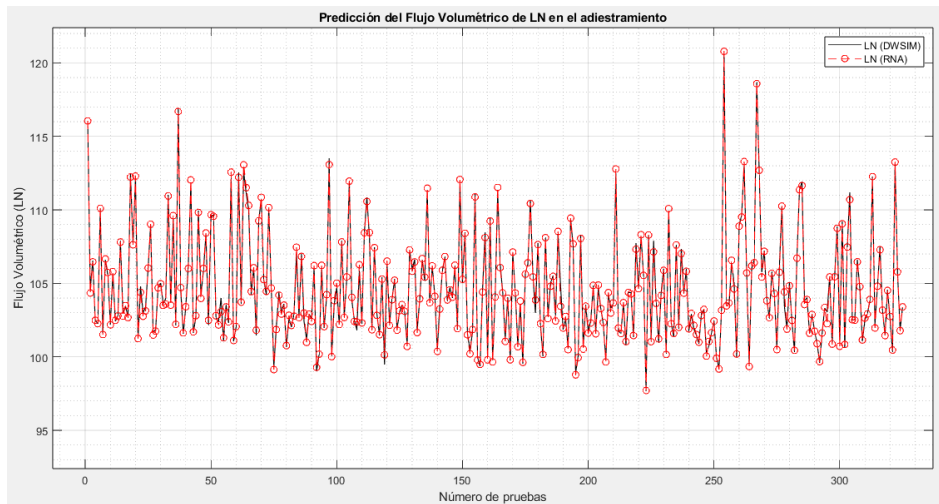


Ilustración 4-7: Predicción del Flujo Volumétrico de LN en el adiestramiento.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m^3/h) de Heavy Naphtha (HN)

Para el flujo volumétrico de Heavy Naphtha (HN) se obtuvo un error promedio porcentual de 0.43921 durante el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial comparando los valores reales o experimentales (DWSIM) con los predichos (RNA), este valor es bajo por el valor de trainPerformance de la Red Neuronal ($7.7695 \text{ E-}05$) pero un poco más alto que LN debido a que el rango de variaciones es más amplio que en LN siendo el rango desde 55 hasta 105 aproximadamente en los resultados lo cual se ve reflejado en la ilustración 4-8, esta muestra el rango mencionado y que los valores reales y predichos no presentan gran diferencia dándonos como resultado que es confiable para predecir este parámetro.

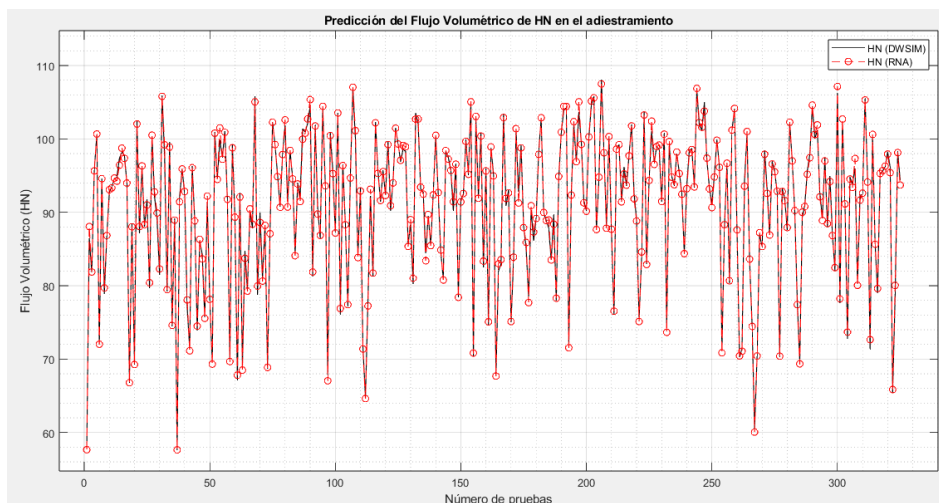


Ilustración 4-8: Predicción del Flujo Volumétrico de HN en el adiestramiento.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m³/h) de Light Distillate (LD)

En el flujo volumétrico de Light Distillate (LD) se obtuvo un error promedio porcentual de 0.14028 durante el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial comparando los valores reales o experimentales (DWSIM) con los predichos (RNA), este valor se debe a que el valor de trainPerformance de la Red Neuronal es bastante cercano a cero (7.7695×10^{-5}) e incluso es casi igual de bajo que en LN debido a que las variaciones no son tantas, es decir que los resultados tienden un rango sin importar que también se tiene un rango amplio de 165 a 195 aproximadamente en los resultados lo cual se ve reflejado en la ilustración 4-9, esta muestra que los la tendencia de los resultados en algunos rangos y que los valores reales y predichos no presentan diferencias notables dándonos como resultado que es confiable para predecir este parámetro.

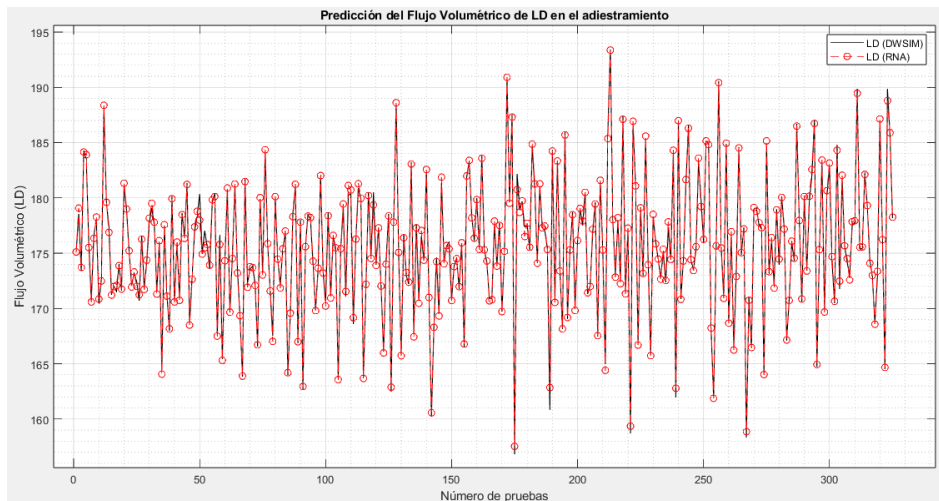


Ilustración 4-9: Predicción del Flujo Volumétrico de LD en el adiestramiento.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m³/h) de Heavy Distillate (HD)

Para el flujo volumétrico de Heavy Distillate (HD) se obtuvo un error promedio porcentual de 0.16288 durante el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial, este valor es casi igual de bajo que en LN y HN debido al rango en los resultados siendo este de 50 a 60 aproximadamente lo cual se presencia en la ilustración 4-10, esta muestra el rango mencionado y que los valores reales y predichos casi no se diferencian dándonos como resultado que es confiable para predecir este parámetro.

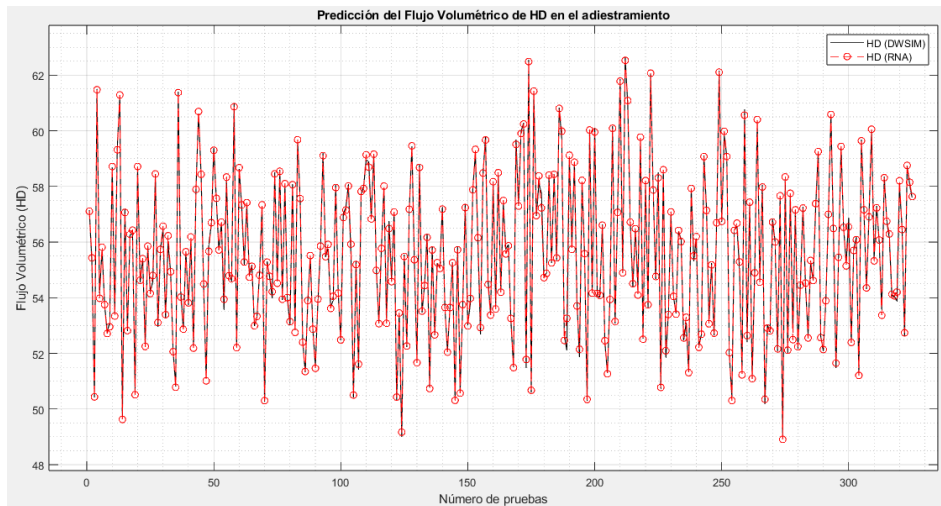


Ilustración 4-10: Predicción del Flujo Volumétrico de HD en el adiestramiento.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m³/h) de Residue (RESIDUE)

Finalmente para el flujo volumétrico de Residue (RESIDUE) durante el adiestramiento de la Red Neuronal Artificial tuvo un error porcentual promedio de 0.12655 comparando los valores reales o experimentales (DWSIM) con los predichos (RNA), este valor es el más bajo entre las otras 4 salidas por la razón del valor de la fase de entrenamiento la Red que es muy acercado a cero ($7.7695 \text{ E-}05$) lo cual se presencia en la ilustración 4-11, esta muestra que los valores reales van muy a la par con los valores predichos por la Red afirmando el error porcentual promedio y siendo así confiable para la predicción de este parámetro.

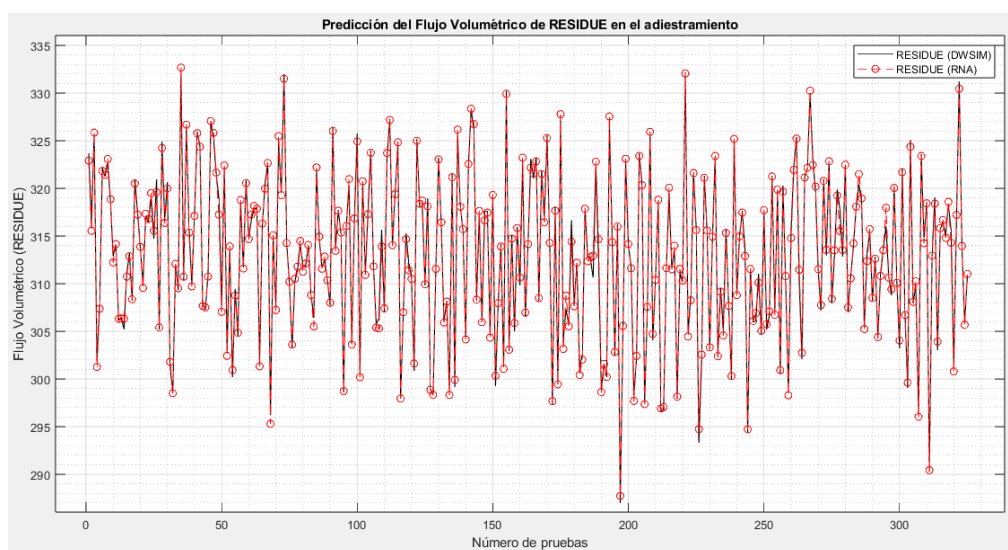


Ilustración 4-11: Predicción del Flujo Volumétrico de RESIDUE en el adiestramiento.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

4.5.1.2. Datos predichos en la validación externa

Flujo volumétrico (m³/h) de Light Naphtha (LN)

Para la predicción del flujo volumétrico de Light Naphtha en base a los 25 datos utilizados para la validación externa se obtuvo un error porcentual promedio de 0.65751 lo cual es superior determinado en el adiestramiento de la red, esto se debe a dos razones: principalmente al valor de testPerformance que resultó ser 2.6904 E-04 lo cual es mayor al valor de trainPerformance y la segunda por diferencia entre valores que no son iguales entre reales y predichos, es un rango de diferencia de máximo 10 unidades lo cual hace que el error no sea tan alto al tratarse de cantidades grandes. En la ilustración 4-12 se observa relación entre los valores reales (DWSIM) y los predichos (RNA) lo cual se verifica con el valor del error porcentual promedio.

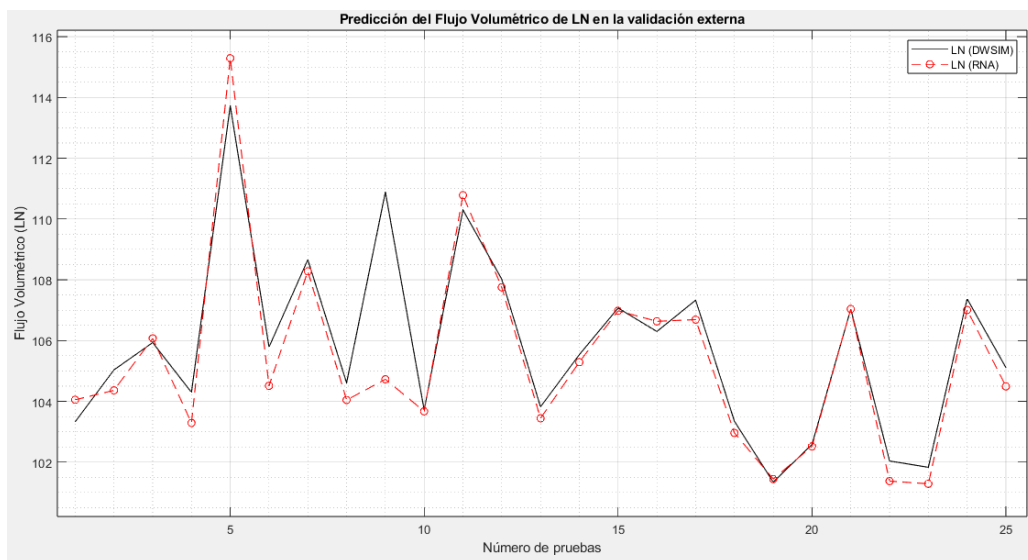


Ilustración 4-12: Predicción del Flujo Volumétrico de LN en la validación externa.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m³/h) de Heavy Naphtha (HN)

Para el flujo volumétrico de Heavy Naphtha se obtuvo un error porcentual promedio de 2.23245 el cual resulta ser el más alto de todos los productos, esto se debe al rango de diferencia de 25 unidades en un resultado lo cual hace que el error sea alto pero el promedio no es tan alto al tratarse de cantidades grandes. En la ilustración 4-13 se observa relación entre los valores reales (DWSIM) y los predichos (RNA) lo cual se verifica con el valor del error porcentual promedio.

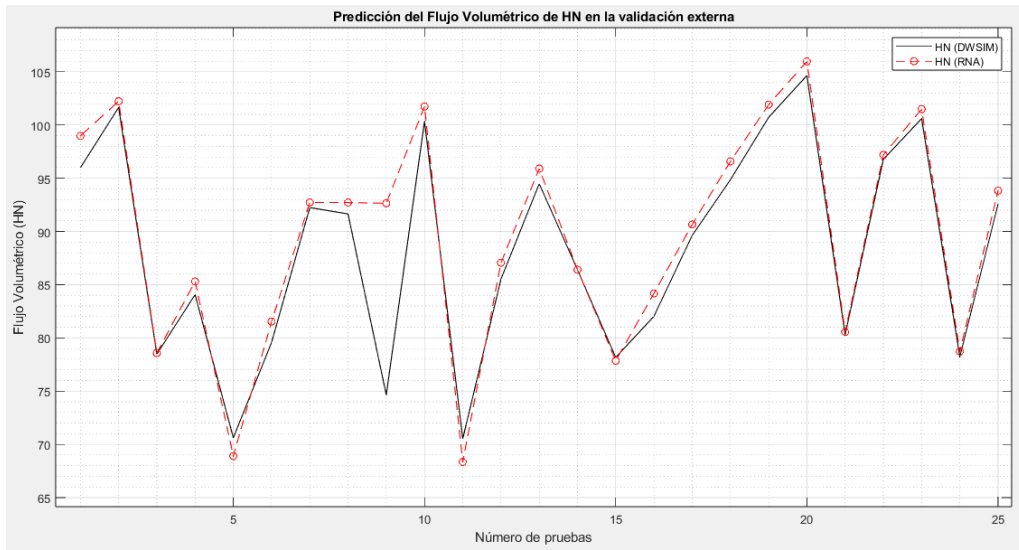


Ilustración 4-13: Predicción del Flujo Volumétrico de HN en la validación externa.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024

Flujo volumétrico (m³/h) de Light Distillate (LD)

En el flujo volumétrico de Light Distillate se obtuvo un error porcentual promedio de 0.56897. En la ilustración 4-14 se observa de mejor manera por qué se tiene un error porcentual promedio con ese valor teniendo relación entre los valores reales (DWSIM) y los predichos (RNA).

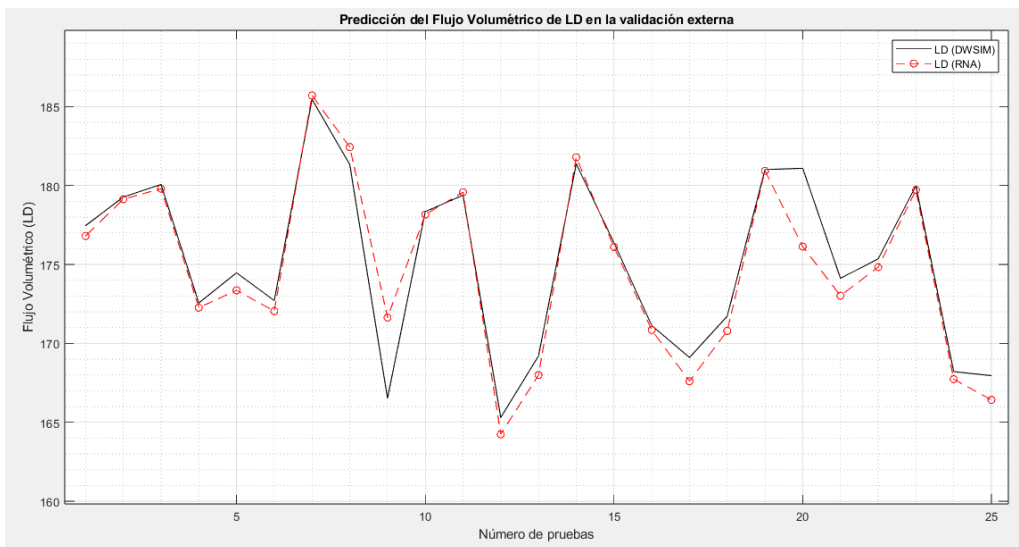


Ilustración 4-14: Predicción del Flujo Volumétrico de LD en la validación externa.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024

Flujo volumétrico (m³/h) de Heavy Distillate (HD)

Para el flujo volumétrico de Heavy Distillate se obtuvo un error porcentual promedio de 0.68396, al tratarse de cantidades grandes y que no varíen mucho en el resultado hace que el error sea alto. En la ilustración 4-15 se observa relación entre los valores reales (DWSIM) y los predichos (RNA) lo cual se verifica con el valor del error porcentual promedio.

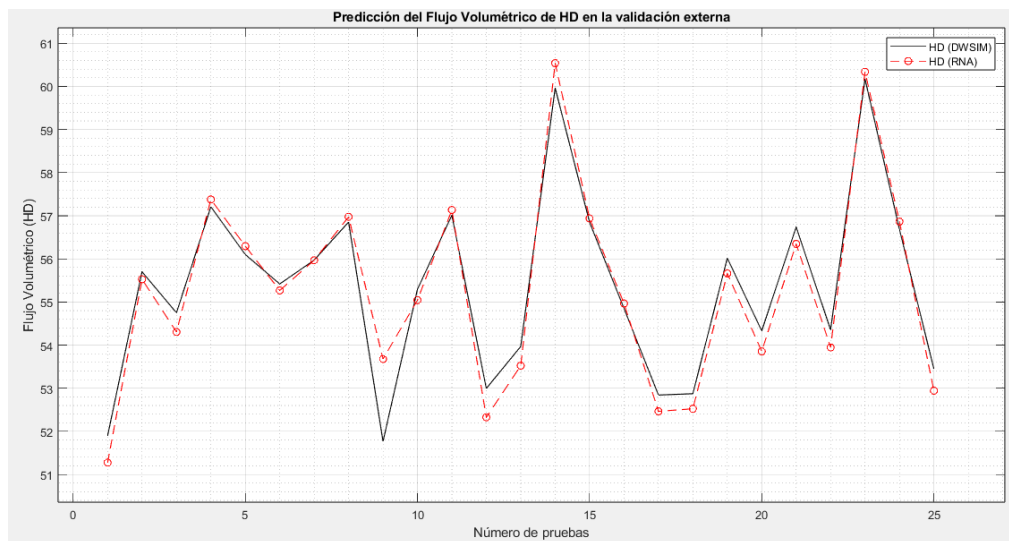


Ilustración 4-15: Predicción del Flujo Volumétrico de HD en la validación externa.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Flujo volumétrico (m³/h) de Residue (RESIDUE)

Finalmente, para el flujo volumétrico de Residue se obtuvo un error porcentual promedio de 0.12655 el cual resulta ser el más bajo de todos los productos, esto se debe al rango de diferencia de 7 unidades como máximo en algunos resultados lo cual hace que el error sea tan bajo y más aún al tratarse de cantidades grandes. En la ilustración 4-16 se observa relación tan estrecha entre los valores reales (DWSIM) y los predichos (RNA) lo cual se verifica con el valor del error porcentual promedio.

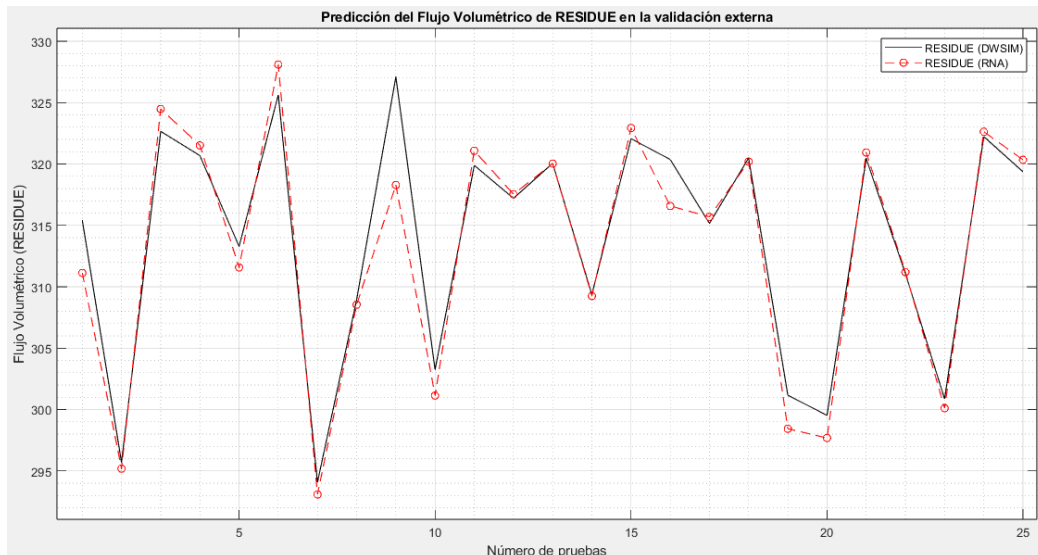


Ilustración 4-16: Predicción del Flujo Volumétrico de RESIDUE en la validación externa.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Los resultados de los errores porcentuales de la validación externa indicaron un funcionamiento adecuado de la RNA junto con los de entrenamiento, a pesar del aumento en los valores de los errores porcentuales promedio. Con el fin de respaldar la fiabilidad de la red, se llevó a cabo un análisis estadístico para determinar si la RNA tiene la capacidad predictiva suficiente para ser utilizada como una herramienta en la predicción de los flujos volumétricos de LN, HN, LD, HD y RESIDUE en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) con los parámetros de diseño que se presentaron en este trabajo.

4.6. Resultados del análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico comparativo ANOVA entre los valores predichos por la Red Neuronal Artificial (RNA) y los obtenidos mediante la simulación en DWSIM. El objetivo está en respaldar la capacidad predictiva de la RNA para pronosticar los flujos volumétricos de LN, HN, LD, HD y RESIDUE en una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) con los parámetros de diseño que presentados en el capítulo 3. Para este análisis, se empleó el programa estadístico Statgraphics Centurion 19, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-5.

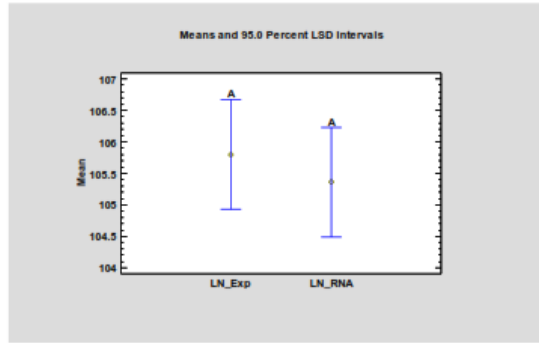
Tabla 4-5: Resultados del análisis estadístico ANOVA.

Análisis Comparativo	Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
LN	Entre grupos	2.42205	1	2.42205	0.26	0.6131
	Intra grupos	448.742	48	9.3488		
	Total (Corr.)	451.164	49			
HN	Entre grupos	27.8574	1	27.8574	0.26	0.6109
	Intra grupos	5098.23	48	106.213		
	Total (Corr.)	5126.09	49			
LD	Entre grupos	2.18015	1	2.18015	0.07	0.7930
	Intra grupos	1502.45	48	31.3011		
	Total (Corr.)	1504.63	49			
HD	Entre grupos	0.0782628	1	0.0782628	0.02	0.9009
	Intra grupos	239.782	48	4.99546		
	Total (Corr.)	239.86	49			
RESIDUE	Entre grupos	6.71428	1	6.71428	0.07	0.7953
	Intra grupos	4733.2	48	98.6084		
	Total (Corr.)	4739.92	49			

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

Para obtener los resultados, el método ANOVA dividió la varianza de los datos en dos secciones: una entre grupos y otra dentro de los grupos, con el fin de calcular la razón-F, que resultó ser 0.2590, 0.2622, 0.0697, 0.0157 y 0.0681 para los flujos volumétricos de LN, HN, LD, HD y RESIDUE respectivamente. Dado que el valor-P para cada análisis es mayor que 0.05, se puede concluir que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las variables, lo que indica un nivel de confianza del 95.00%. Además, en las figuras 4-17, 4-18, 4-19, 4-20 y 4-21 se muestran las gráficas de medias y cajas-bigotes, donde se observa que los resultados presentan relación, confirmando la proximidad de los resultados y el nivel de confianza de cada estudio.

a)



b)

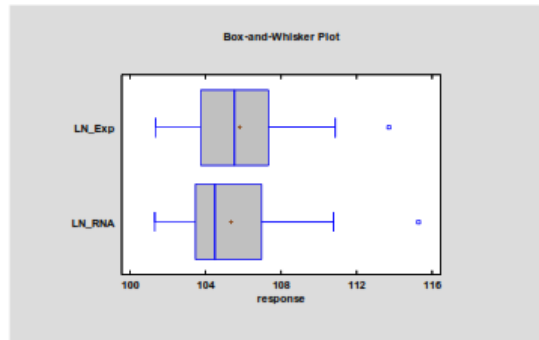
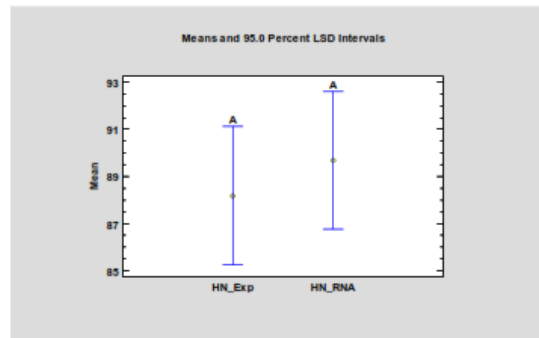


Ilustración 4-17: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de LN

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

a)



b)

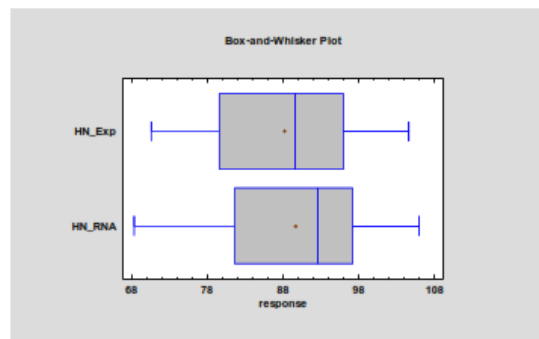
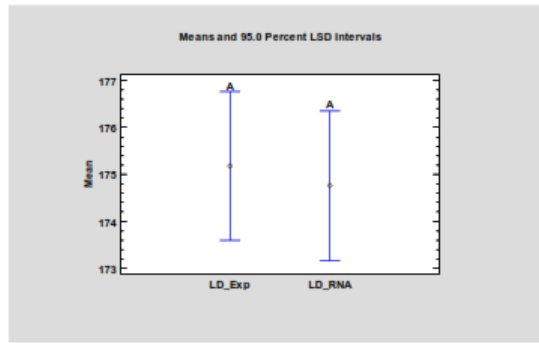


Ilustración 4-18: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de HN.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

a)



b)

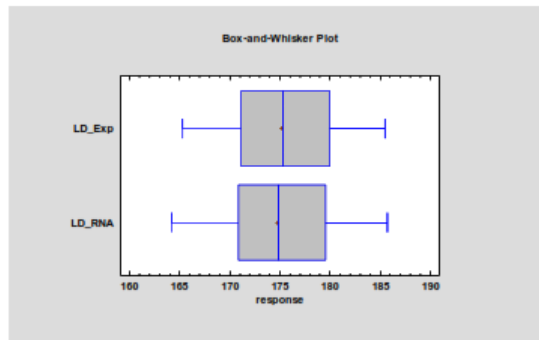
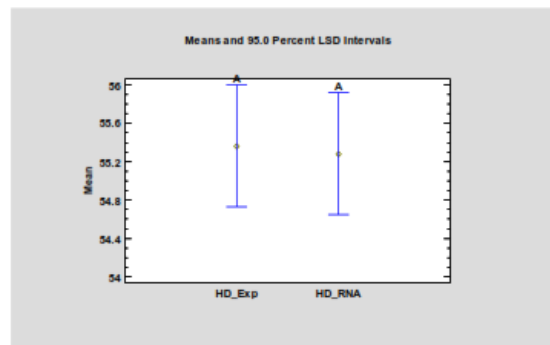


Ilustración 4-19: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de LD.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

a)



b)

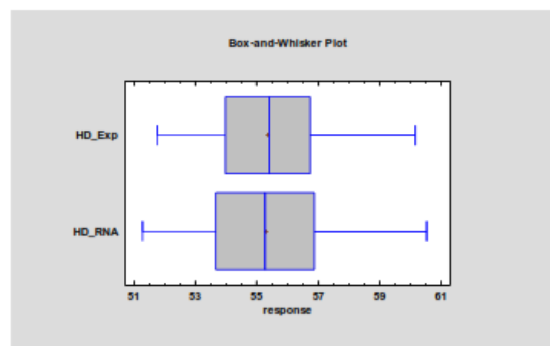
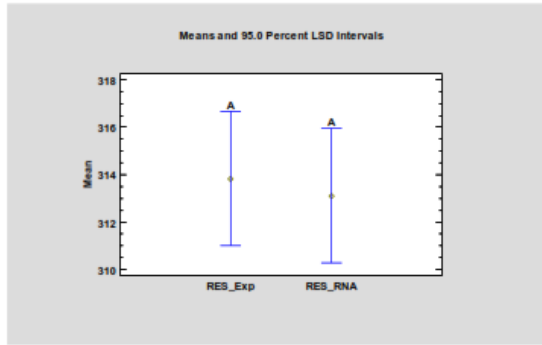


Ilustración 4-20: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de HD.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

a)



b)

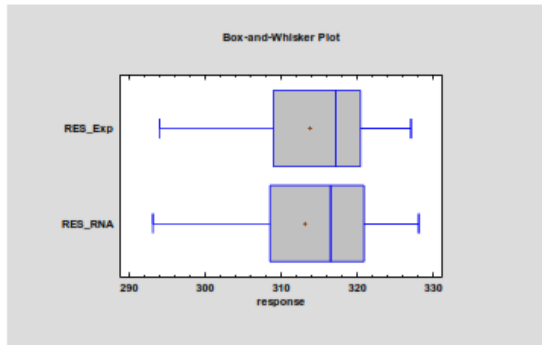


Ilustración 4-21: Gráficas de medias (a) y cajas-bigotes (b) de RESIDUE.

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo la simulación de una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) con las especificaciones del crudo y condiciones operativas de la torre de fraccionamiento especificadas mediante el software de código libre DWSIM, validando esta simulación mediante una comparación con el proceso planteado por Ibrahim et al., (2021) obteniendo errores porcentuales que no superaron el 10% y un análisis estadístico determinando la relación entre los valores simulados (reales) y predichos.
- Se identificaron las variables, parámetros y las operaciones necesarias para la simulación de la Unidad de Destilación de Crudo (CDU) siendo las temperaturas a la que hay %VAP de crudo que es parte de las curvas de destilación TBP una de las variables más importantes para este proceso en cuestión del crudo para que exista una variación en la cantidad de producto que se obtiene de LN, HN, LD, HD y RESIDUE, en los parámetros de operación fueron el número de etapas junto con las especificaciones de por cuales etapas existe alimentación (crudo y vapor de agua), retorno (por parte de los side-strippers) y salidas a side-strippers (sidestreams) y las operaciones necesarias para este proceso resultaron ser el precalentamiento del crudo lo cual facilita la separación de los componentes en la torre de fraccionamiento principal (CSCOL-1), la torre de fraccionamiento, los side-strippers, las recirculaciones de estos (HN, LD y HD) a la torre principal y el enfriamiento de una de las corrientes para obtener el producto deseado (LN-COOLED).
- La Unidad de Destilación de Crudo (CDU) simulada en el programa DWSIM se validó mediante un análisis donde se compararon los valores obtenidos por parte del simulador DWSIM y datos presentados en el artículo científico del cual nos basamos para especificaciones del crudo y condiciones operativas obteniendo así un error porcentual de 8.5% lo cual no superó el 10% y por ende se validó la simulación para uso posterior. El valor de error porcentual que obtuvimos se debe a que DWSIM no cuenta con una Unidad de Destilación de Crudo (CDU) como tal a diferencia de Aspen HYSYS ® que tiene en sus herramientas y equipos a usar esta torre con variaciones para que el usuario elija acorde a su necesidad, en este caso de estudio tuve que armar 4 columnas ChemSep y adaptar el proceso presentado en Aspen HYSYS ® a DWSIM.

- Para la predicción de los productos deseados en el proceso que fueron LN, HN, LD, HD y RESIDUE se implementó un Red Neuronal Artificial (RNA) diseñándola con una base de 325 datos para su entrenamiento y 25 datos para su validación externa, la base de datos se realizó después de haber validado la simulación y acorde a esto reconocer las variables que afectarían de manera significativa a los resultados o productos de interés en el proceso siendo así que las temperaturas a las que hay % VAP en las curvas de destilación TBP fueron las entradas (10 datos) y los productos de la torre de fraccionamiento las salidas (5 datos). En el diseño de la red neuronal se realizaron pruebas con los tres algoritmos que MATLAB ofrece (LM, BR y SCG) comparándolos en la etapa de Validación y Prueba al valor más acercado a cero en el Error Cuadrático Medio (MSE) y a la Regresión Lineal (R) con un valor más acercado a uno escogiendo en base a esto al algoritmo BR (Bayesian Regularization) teniendo un MSE de 2.6904×10^{-4} y R de 0.9971 en la fase de prueba de la red. Se dispuso una arquitectura para la red de 10 entradas, 20 neuronas ocultas y 5 salidas.
- Para evaluar la capacidad de predicción de la Red Neuronal Artificial (RNA) se realizó un análisis estadístico usando el método ANOVA en los productos de interés que son LN, HN, LD, HD y RESIDUE comparando los reales (DWSIM) con los predichos (RNA) usando los datos de la validación externa (25) determinando así que al nivel de confianza de 95% no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las variables y por ende la predicción de la Red Neuronal es confiable y presenta una gran capacidad de predicción correcta.

RECOMENDACIONES

- En la creación de la base de datos tener muy en cuenta una selección adecuada de variables de entrada y que estas estén en rangos coherentes en base a bibliografía ya que al cometer este error dificultará el levantamiento de la base y tomará mucho más tiempo.
- Llevar a cabo un adecuado proceso de entrenamiento al diseñar la red neuronal artificial (RNA) es crucial, ya que el principal problema que suele surgir es el sobre entrenamiento lo cual es darle más capas y neuronas ocultas de las necesarias. Esto puede resultar en una red que proporciona predicciones precisas solo cuando los datos de entrada son similares a los datos de entrenamiento, pero falla al predecir valores atípicos o fuera del rango de los datos de entrenamiento lo cual resulta en una Red Neuronal solo para los datos con lo que se entrenó más no aprendió nada.
- Se recomienda usar el trabajo presentado para futuros estudios en torres de fraccionamiento al vacío, de esta manera se sacaría provecho de la corriente RESIDUE lo cual se hace en refinerías, esto con el fin de obtener más producto y hacer un proceso mucho más completo y rentable para la industria

BIBLIOGRAFÍA

1. **(AOP), ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE OPERADORES DE PRODUCTOS PETROLIFEROS**, 2002. *El petróleo* [online]. Madrid : AOP (ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE OPERADORES DE PRODUCTOS PETROLIFEROS). Retrieved from : <https://www.studocu.com/bo/document/instituto-tecnico-nueva-bolivia/analisis-de-estados-financieros/aop-fichas-didacticas-nada/32009587>
2. **(ICCT), THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION**, 2011. *Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diesel con contenido ultra bajo de azufre* [online]. Retrieved from : http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf
3. **AHMADIAN BEHROOZ, Hesam**, 2019. Robust set-point optimization of inferential control system of crude oil distillation units. *ISA Transactions*. Vol. 95, no. xxxx, pp. 93–109. DOI 10.1016/j.isatra.2019.05.022.
4. **AL-MAYYAH, Mohammad A., HOADLEY, Andrew F.A. and RANGAIAH, G. P.**, 2014. Energy optimization of crude oil distillation using different designs of pre-flash drums. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 73, no. 1, pp. 1204–1210. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.024.
5. **ALTAWELL, Najib**, 2021. Crude oil. In : *Rural Electrification*, pp. 39–80. Elsevier. ISBN 9780128224038. DOI 10.1016/B978-0-12-822403-8.00003-5.
6. **ASTM**, 2015. *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure* [online]. Book of Standards 05.01. Retrieved from : <http://www.astm.org/Standards/D86.htm>
7. **BARAHONA ALVEAR, Natalia Sofí et al.**, 2018. Optimización de la Destilación del crudo ecuatoriano Oriente utilizando Aspen Plus®. *Ciencia e Ingeniería* [online]. Vol. 39, pp. 239–248. Retrieved from :

<https://www.redalyc.org/journal/5075/507557607004/html/>

8. BEALE, Mark Hudson, HAGAN, Martin T and DEMUTH, Howard B, 2010. *Neural Network Toolbox™ 7 User 's Guide*. ISBN 0971732108.
9. **BIRKY, G. J. and MCAVOY, T. J.**, 1990. A neural net to learn the design of distillation controls. *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 22, no. 8, pp. 231–238. DOI 10.1016/s1474-6670(17)53362-5.
10. **CHANG, Byoungmu et al.**, 1998. Rigorous industrial dynamic simulation of a crude distillation unit considered valve tray rating parameters. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 22, no. SUPPL.1, pp. 863–866. DOI 10.1016/s0098-1354(98)00167-7.
11. **CHEMSEP**, 2020. ChemSep Modeling Separation Processes. [online]. 2020. Retrieved from : <http://chemsep.org/>
12. **CHEN, L.**, 2008. *Heat Integrated Crude Oil Distillation System design*. . The University of Manchester.
13. **CLEWS, R.J.**, 2016. Petroleum Refining. In : *Project Finance for the International Petroleum Industry*, pp. 119–136. Elsevier Inc. ISBN 9780128001585. DOI 10.1016/B978-0-12-800158-5/00007-4.
14. **DWSIM - THE OPEN SOURCE CHEMICAL PROCESS SIMULATOR**, 2015. DWSIM Chemical Process Simulator. [online]. 2015. Retrieved from : <https://dwsim.fossee.in/>
15. **DWSIM - THE OPEN SOURCE CHEMICAL PROCESS SIMULATOR**, 2023. DWSIM. [online]. 2023. Retrieved from : <https://dwsim.org/index.php/about/>
16. **ENRÍQUEZ-GUTIÉRREZ, V. M. et al.**, 2015. Retrofit of heat-integrated crude oil distillation columns. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 99, pp. 185–198. DOI 10.1016/j.cherd.2015.02.008.

17. **ERRICO, Massimiliano, TOLA, Giuseppe and MASCIA, Michele**, 2009. Energy saving in a crude distillation unit by a preflash implementation. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 29, no. 8–9, pp. 1642–1647. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.011.
18. **FAGAN, Alphonsus**, 1991. *An Introduction to The Petroleum Industry, Department of Mines and Energy of the Government of Newfoundland and Labrador*. [online]. Retrieved from : <https://www.gov.nl.ca/iet/files/publications-energy-intro.pdf>
19. **GADALLA, Mamdouh et al.**, 2013. A new optimisation based retrofit approach for revamping an Egyptian crude oil distillation unit. *Energy Procedia*. Vol. 36, no. 012, pp. 454–464. DOI 10.1016/j.egypro.2013.07.051.
20. **GADALLA, Mamdouh A.**, 2003. *RETROFIT DESIGN OF HEAT-INTEGRATED CRUDE OIL DISTILLATION SYSTEMS*. . The University of Manchester.
21. **GADALLA, Mamdouh A. et al.**, 2015. A rigorous simulation-based procedure for retrofitting an existing Egyptian refinery distillation unit. *Energy*. Vol. 83, pp. 756–765. DOI 10.1016/j.energy.2015.02.085.
22. **GREAVES, M a et al.**, 2003. Application to a Middle-vessel Column. *Optimization*. Vol. 81, no. March.
23. **IBRAHIM, Dauda et al.**, 2018. Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 134, pp. 212–225. DOI 10.1016/j.cherd.2018.03.006.
24. **IBRAHIM, Dauda et al.**, 2021. Optimal design of flexible heat-integrated crude oil distillation units using surrogate models. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 165, pp. 280–297. DOI 10.1016/j.cherd.2020.09.014.
25. **JORGE DAGNINO, S.**, 2014. Análisis de varianza. *Revista Chilena de Anestesia*.

Vol. 43, no. 4, pp. 306–310. DOI 10.2307/j.ctvvvn8k0.7.

26. **JUÁREZ LUGO, Carlos Saúl**, 2015. *Análisis de varianza de tipo I: Anova I* [online]. Universidad Autónoma de Estado de México. Retrieved from : <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/33860/secme-16960.pdf?sequence=1>
27. **KHAYET, M. and COJOCARU, C.**, 2013. Artificial neural network model for desalination by sweeping gas membrane distillation. *Desalination*. Vol. 308, pp. 102–110. DOI 10.1016/j.desal.2012.06.023.
28. **LEE, In Soo et al.**, 2001. Neural Network-Based Software Sensor for Feed Identification in Crude Distillation Unit. *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 34, no. 27, pp. 285–290. DOI 10.1016/s1474-6670(17)33606-6.
29. **LI, Hao, ZHANG, Zhien and LIU, Zhijian**, 2017. Application of artificial neural networks for catalysis: A review. *Catalysts*. Vol. 7, no. 10. DOI 10.3390/catal7100306.
30. **LI, Sihong et al.**, 2022. Mechanism-embedded neural network modeling and operation optimization of a distillation unit with varying production performance. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 183, pp. 221–234. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.04.031>.
31. **LIAU, Leo Chau Kuang, YANG, Thomas Chung Kuang and TSAI, Ming Te**, 2004. Expert system of a crude oil distillation unit for process optimization using neural networks. *Expert Systems with Applications*. Vol. 26, no. 2, pp. 247–255. DOI 10.1016/S0957-4174(03)00139-8.
32. **LUO, R. F., SHAO, H. H. and ZHANG, Z. J.**, 1995. Fuzzy-neural-net-based inferential control for a high-purity distillation column. *Control Engineering Practice*. Vol. 3, no. 1, pp. 31–40. DOI 10.1016/0967-0661(94)00061-K.
33. **MARIGÓMEZ, I.**, 2014. Oil, Crude. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*.

ISBN 9780123864543. DOI 10.1016/B978-0-12-386454-3.00524-8.

34. **MARIÑO PEACOK, Thyset, LABRADA VÁZQUEZ, Benigno and SÁNCHEZ DEL CAMPO LAFITA, Ana**, 2016. *Simulación de la unidad de estabilización de la refinería “Hermanos Díaz” empleando el simulador Aspen Hysys 8.0* [online]. Dirección de Información Científico-Técnica, Universidad de Oriente. Retrieved from : http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300004&lng=es&nrm=iso&tlng= [accessed 9 August 2023].
35. **MATHWORKS**, 2023. About MathWorks. [online]. 2023. Retrieved from : https://www.mathworks.com/company.html?s_tid=hp_ff_a_company
36. **MOTLAGHI, S., JALALI, F. and AHMADABADI, M. Nili**, 2008. An expert system design for a crude oil distillation column with the neural networks model and the process optimization using genetic algorithm framework. *Expert Systems with Applications*. Vol. 35, no. 4, pp. 1540–1545. DOI 10.1016/j.eswa.2007.08.105.
37. **NALINAKSHAN, Shankar et al.**, 2019. Progressive crude oil distillation: An energy-efficient alternative to conventional distillation process. *Fuel*. Vol. 239, no. October 2018, pp. 1331–1337. DOI 10.1016/j.fuel.2018.11.033.
38. **NEDELICHEV, Angel et al.**, 2011. Boiling point distribution of crude oils based on TBP and astm D-86 distillation data. *Petroleum and Coal*. Vol. 53, no. 4, pp. 275–290.
39. **OCHOA-ESTOPIER, Lluvia M., JOBSON, Megan and SMITH, Robin**, 2013. Operational optimization of crude oil distillation systems using artificial neural networks. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 59, pp. 178–185. DOI 10.1016/j.compchemeng.2013.05.030.
40. **OCHOA-ESTOPIER, Lluvia M., JOBSON, Megan and SMITH, Robin**, 2014. The use of reduced models for design and optimisation of heat-integrated crude oil distillation systems. *Energy*. Vol. 75, pp. 5–13. DOI 10.1016/j.energy.2014.06.043.

41. **PANNOCCHIA, Gabriele et al.**, 2006. *Rigorous Simulation and Model Predictive Control of a Crude Distillation Unit*. IFAC.
42. **PINO, Adriá Cortés del**, 2014. *Proceso de refino del petróleo para la obtención de combustibles marinos* [online]. Barcelona : UPC. Retrieved from : <https://core.ac.uk/download/pdf/41815071.pdf>
43. **PORRAZZO, R. et al.**, 2013. A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 54, pp. 79–96. DOI 10.1016/j.compchemeng.2013.03.015.
44. **RAIMONDI, Angelo et al.**, 2015. Design of an adaptive predictive control strategy for crude oil atmospheric distillation process. *Control Engineering Practice*. Vol. 34, pp. 39–48. DOI 10.1016/j.conengprac.2014.09.014.
45. **SAVKOVIC-STEVANOVIC, J.**, 1996. Neural net controller by inverse modeling for a distillation plant. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 20, no. SUPPL.2, pp. 925–930. DOI 10.1016/0098-1354(96)00162-7.
46. **SHARMA, Neha and SINGH, Kailash**, 2012. Model predictive control and neural network predictive control of TAME reactive distillation column. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. Vol. 59, pp. 9–21. DOI 10.1016/j.cep.2012.05.003.
47. **SHI, Bin, YANG, Xu and YAN, Liexiang**, 2017. Optimization of a crude distillation unit using a combination of wavelet neural network and line-up competition algorithm. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Vol. 25, no. 8, pp. 1013–1021. DOI 10.1016/j.cjche.2017.03.035.
48. **SHOTONWA, I. O., GIWA-AJENIYA, A. O. and MEKULEYI, Gabriel Olarinde**, 2018. The Physical and Chemical Components of Nigerian Crude Oil. In : *The Political Ecology of Oil and Gas Activities in the Nigerian Aquatic Ecosystem*, pp. 33–46. Elsevier Inc. ISBN 9780128096284. DOI 10.1016/B978-0-12-809399-

3.00003-3.

49. **SOTELO, David et al.**, 2017. Design and implementation of a control structure for quality products in a crude oil atmospheric distillation column. *ISA Transactions*. Vol. 71, pp. 573–584. DOI 10.1016/j.isatra.2017.08.005.
50. **TANGSRIWONG, Kwanchanok et al.**, 2020. Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen plus and DWSIM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 463, no. 1, pp. 0–10. DOI 10.1088/1755-1315/463/1/012057.
51. **TAVAKOLMOGHADAM, M. and SAFAVI, Mohammadali**, 2012. An optimized neural network model of desalination by vacuum membrane distillation using genetic algorithm. *Procedia Engineering*. Vol. 42, pp. 106–112. DOI 10.1016/j.proeng.2012.07.400.
52. **WAHEED, M. A. et al.**, 2014. Thermo-economic and environmental assessment of a crude oil distillation unit of a Nigerian refinery. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 66, no. 1–2, pp. 191–205. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.007.
53. **WAHEED, M. A. and ONI, A. O.**, 2015. Performance improvement of a crude oil distillation unit. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 75, pp. 315–324. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.078.
54. **WATKINS, R. N.**, 1979. *Petroleum refinery distillation* [online]. Houston : Gulf publishing company. Retrieved from : https://www.academia.edu/41596697/Watkins_R._1979_Petroleum_Refinery_Distillation
55. **YAN, Chenglei et al.**, 2019. Application of retrofitted design and optimization framework based on the exergy analysis to a crude oil distillation plant. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 154, no. March, pp. 637–649. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.128.

56. **YOON, Yo Sung et al.**, 2022. Development of inferential sensor and real-time optimizer for a vacuum distillation unit by recurrent neural network modeling of time series data. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 168, p. 108039. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108039>.
57. **ZAFARI, Pedram and GHAEMI, Ahad**, 2023. Modeling and optimization of CO₂ capture into mixed MEA-PZ amine solutions using machine learning based on ANN and RSM models. *Results in Engineering*. Vol. 19, no. April, p. 101279. DOI 10.1016/j.rineng.2023.101279.
58. **ZHOU, J., KOOIJMAN, H. A. and TAYLOR, R.**, 2019. Parallel column model for Dividing Wall Column simulations. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 125, pp. 114–133. DOI 10.1016/j.compchemeng.2019.02.008.



ANEXOS

ANEXO A: BASE DE DATOS CREADA PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA RNA.

N° datos	Entradas										Salidas				
	%VAP										Flujo volumétrico (m3/h)				
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	LN-COOLED	HN	LD	HD	RESIDUE
1	44	50	95	143	228	289	333	383	455	499	116.003	57.7841	175.079	57.1598	323.635
2	36	63	108	162	207	278	322	363	458	529	104.611	86.4991	178.569	55.2682	316.517
3	41	60	94	157	226	244	315	379	464	540	106.54	81.787	173.397	50.4225	325.766
4	35	93	95	159	223	274	340	367	410	542	102.473	95.751	184.278	61.4891	301.826
5	41	58	123	159	229	254	320	361	446	533	102.26	100.536	183.506	54.1695	307.753
6	42	62	95	148	220	275	323	376	443	531	110.115	71.9441	175.944	55.7145	322.117
7	36	72	113	160	205	261	341	381	468	507	101.562	94.5701	170.721	53.7682	321.245
8	36	75	83	162	228	250	322	368	466	559	106.593	78.8705	176.61	52.7704	322.698
9	44	56	106	155	223	265	308	381	443	519	105.549	86.8618	178.107	53.093	318.649
10	42	90	116	140	208	272	338	386	428	509	102.2	92.6749	170.432	58.6795	312.88
11	37	57	108	147	215	250	326	372	426	499	105.642	93.5475	172.669	53.424	314.144
12	40	54	120	165	218	289	330	362	422	555	102.413	94.5621	188.166	59.428	306.179
13	38	82	101	160	208	280	350	377	411	519	102.814	94.7707	179.559	61.1949	306.394
14	38	62	101	162	230	252	305	389	466	491	107.895	97.3525	177.327	49.6356	305.24
15	41	82	109	147	216	251	345	385	413	542	102.946	98.2054	171.24	57.152	311.016
16	44	71	122	143	214	255	306	379	446	530	103.462	97.7364	172.01	52.8097	313.176
17	40	88	124	143	205	260	335	361	448	501	102.742	93.9304	171.512	56.2633	308.244
18	37	62	97	150	205	289	318	365	457	530	112.443	66.7794	173.992	56.2737	320.937
19	45	56	106	146	215	245	306	360	444	539	107.701	88.488	171.663	50.6966	317.491
20	36	52	96	141	229	285	320	370	412	523	112.153	69.3207	181.058	58.6531	313.761
21	39	76	112	162	226	252	324	389	440	495	101.277	102.49	178.862	54.5615	310.004
22	40	56	124	146	212	269	332	364	457	519	104.769	87.2441	175.145	55.3974	317.053
23	39	68	125	140	226	253	313	388	469	520	102.992	96.0814	172.062	52.328	316.433
24	37	69	117	150	206	278	327	375	461	523	103.377	88.0646	173.205	55.8432	318.943
25	37	77	83	161	202	267	315	385	417	502	105.952	91.7781	172.413	54.2169	314.793
26	38	49	103	140	220	253	341	368	415	547	109.013	79.7403	170.693	54.5779	320.913
27	36	87	116	146	224	260	330	390	412	532	101.687	100.258	176.571	58.4346	305.198
28	41	71	108	162	206	268	322	390	470	545	101.86	92.1081	171.899	52.9494	324.861
29	35	55	118	146	207	281	318	386	431	496	104.726	89.0741	174.171	55.7467	316.772
30	36	60	116	142	227	284	311	389	448	539	105.016	81.5215	177.74	56.4429	320.613
31	41	49	86	158	207	240	306	367	423	508	103.621	105.916	179.074	53.2988	301.307
32	44	86	126	154	216	270	336	371	467	499	103.945	97.6991	177.567	55.9428	298.559
33	44	79	93	156	201	279	328	368	461	502	111.015	79.2361	171.602	54.9137	311.876
34	40	66	120	152	215	252	303	365	449	532	103.652	99.5418	175.978	52.0718	309.389

35	41	64	85	156	210	243	347	381	466	496	109.371	74.4459	164.697	50.8224	332.105
36	39	95	104	150	216	278	349	365	434	553	102.148	89.1698	177.495	61.4001	310.407
37	44	50	82	152	200	289	308	368	445	547	116.899	57.6498	171.374	54.2134	326.53
38	39	82	113	140	204	260	302	371	450	540	104.479	92.1528	167.956	52.8646	315.787
39	43	77	124	148	226	259	324	361	467	551	101.554	95.8761	180.101	55.6697	309.913
40	43	67	126	142	205	267	312	372	458	558	103.456	92.4549	170.582	53.749	317.156
41	37	66	86	162	226	267	348	390	434	510	106.252	77.0414	175.988	56.0154	325.913
42	43	66	86	143	220	260	303	379	447	524	111.812	71.4096	170.904	52.221	324.439
43	40	91	113	143	229	263	325	382	433	508	101.639	96.3555	178.655	57.9609	307.863
44	37	86	122	140	206	288	330	368	431	511	102.699	89.0543	176.432	60.6238	307.288
45	43	81	95	146	218	290	307	362	439	535	109.944	73.9045	181.363	58.417	311.005
46	40	66	105	151	212	262	345	390	445	518	104.223	86.0577	168.651	54.4084	326.84
47	44	57	98	163	218	240	340	367	465	531	105.824	84.2758	172.838	51.1026	325.347
48	38	51	93	163	214	270	344	363	429	552	108.349	75.6987	177.016	55.896	321.463
49	40	56	117	164	205	290	328	389	441	509	102.165	91.3307	178.345	56.6015	318.949
50	36	78	96	140	222	282	315	360	414	541	109.506	77.9799	180.345	59.3885	307.743
51	42	69	101	147	222	279	338	372	468	535	109.693	69.7061	174.978	57.5197	322.274
52	35	83	119	145	226	248	319	373	424	523	102.663	100.925	177.032	55.7071	303.329
53	42	71	121	143	225	255	346	376	444	491	102.373	94.5082	175.572	56.7097	313.715
54	40	92	125	149	221	260	321	386	468	502	104.006	99.8178	173.611	53.5762	300.191
55	37	70	122	159	208	280	334	377	436	515	101.101	97.4837	179.581	58.2347	309.453
56	44	65	116	162	209	269	309	374	428	512	103.531	101.053	180.41	54.8922	304.418
57	43	83	121	141	210	252	338	366	469	549	102.293	91.9408	167.592	54.603	318.483
58	45	87	85	142	215	289	328	369	415	540	112.127	69.865	176.633	60.9577	311.713
59	44	81	117	159	201	242	346	385	468	509	101.05	99.2295	165.477	52.2461	320.805
60	36	73	128	140	209	286	329	377	447	519	102.035	89.4975	174.208	58.627	314.729
61	38	48	101	141	227	287	312	373	431	499	112.533	67.1233	180.625	57.2529	316.749
62	35	72	107	154	201	260	342	366	437	545	103.616	92.6408	169.662	55.1967	317.848
63	40	63	89	145	212	285	320	374	419	530	112.593	69.2572	174.771	57.3039	318.01
64	41	76	89	158	228	280	310	379	457	491	111.147	84.6945	181.1	54.8187	301.889
65	39	62	93	142	220	258	328	370	419	507	109.97	79.4481	173.549	55.1603	316.03
66	45	81	107	140	218	257	307	385	456	556	104.278	90.0482	169.276	53.0026	320.494
67	36	77	96	141	213	241	344	380	435	501	106.059	87.8777	163.833	53.3039	322.68
68	35	81	128	165	210	261	305	363	433	514	101.451	105.763	181.685	54.8717	296.263
69	45	85	87	148	205	275	327	372	424	520	109.346	78.7773	172.328	57.2585	314.901
70	41	67	95	154	223	259	303	387	466	495	110.66	89.9601	173.546	50.2823	307.471
71	41	65	104	151	223	266	337	382	453	557	105.23	81.0586	173.858	55.2953	324.489
72	35	84	96	146	225	255	324	377	445	554	104.245	88.1769	172.266	54.7383	319.781
73	36	60	94	149	213	263	348	380	462	518	110.118	68.7691	166.557	53.9983	331.942
74	43	50	119	155	213	279	348	367	428	530	104.62	87.4262	179.849	58.4827	314.217
75	35	93	124	160	210	250	331	376	459	527	99.3411	102.24	173.199	54.639	309.994
76	37	81	108	155	230	269	322	378	417	531	102.069	99.1844	184.175	58.5965	303.306
77	36	62	123	140	227	244	329	360	447	495	104.36	95.1225	175.81	53.9391	310.239
78	37	82	121	140	207	265	343	361	438	519	103.026	90.7519	171.613	58.0245	311.435
79	38	89	101	144	218	241	326	388	421	537	103.605	97.8791	167.573	53.9341	314.053

80	35	68	121	157	230	258	301	388	452	539	100.693	101.871	179.949	53.0284	311.926
81	45	93	107	151	205	276	331	373	442	515	102.625	91.4279	174.441	58.0808	311.815
82	40	68	128	152	211	244	335	362	470	530	102.02	98.2973	172.146	52.8462	314.057
83	41	81	113	146	211	274	339	380	415	534	102.867	94.6797	175.395	59.5663	308.762
84	38	89	107	144	222	277	327	361	466	528	106.95	84.4049	176.742	57.6117	306.385
85	41	82	113	147	201	252	325	378	465	557	102.747	94.0002	163.969	52.4444	321.762
86	36	59	108	142	209	249	304	367	432	505	106.978	92.2864	169.597	51.3325	314.745
87	39	62	97	164	228	240	334	379	423	511	102.409	101.414	178.587	53.8444	311.598
88	45	50	126	163	225	257	341	375	430	546	101.202	100.907	181.063	55.44	312.534
89	40	85	113	155	200	250	310	388	423	551	102.923	102.129	166.869	52.8728	310.361
90	38	53	125	160	223	248	303	378	436	529	102.575	104.489	178.031	51.5548	307.726
91	41	92	93	147	205	256	336	375	470	557	106.073	81.285	162.686	53.8663	326.327
92	42	88	121	157	226	249	341	388	456	553	99.0196	101.907	175.648	55.7292	313.704
93	37	73	124	151	220	283	343	376	467	544	100.152	90.4517	178.55	59.1892	317.711
94	35	67	89	159	215	278	310	389	418	498	106.085	86.499	177.998	55.4623	315.247
95	41	93	123	158	202	254	314	369	412	548	101.953	104.192	174.006	55.7671	298.561
96	44	83	103	148	212	249	326	374	443	523	104.134	94.0061	169.871	53.6719	316.228
97	39	75	83	143	224	267	303	370	458	536	113.497	67.87	173.471	53.9	320.183
98	35	90	118	162	216	270	328	375	441	507	100.056	100.828	182.067	58.0478	303.686
99	37	53	112	157	211	256	338	373	422	545	103.539	95.7494	173.321	54.1579	317.233
100	45	58	83	156	200	259	319	386	443	550	104.707	87.3058	170.63	52.4622	325.751
101	38	83	120	149	227	252	322	390	417	494	102.179	103.538	178.67	57.0269	300.275
102	39	75	103	145	204	289	321	379	447	528	107.897	76.0885	171.14	57.2396	320.677
103	35	71	105	162	200	285	327	384	410	547	102.804	96.4593	176.549	58.0687	310.955
104	36	56	96	155	224	254	348	382	410	513	105.306	88.5034	175.199	55.5565	317.869
105	41	65	84	141	204	252	302	378	427	523	111.974	77.271	163.627	50.4131	323.884
106	35	66	112	151	213	260	326	363	429	544	103.847	95.21	175.47	55.2887	311.843
107	39	58	119	165	226	245	301	379	432	534	102.506	106.727	179.052	51.4188	305.777
108	43	83	126	146	211	247	350	375	416	544	101.833	100.087	171.139	57.7086	306.379
109	38	54	102	155	228	267	347	368	411	558	105.834	84.0069	180.19	57.9964	315.58
110	44	84	114	161	213	284	346	370	461	504	102.3	93.278	180.421	58.9531	307.057
111	37	88	93	146	213	282	347	377	458	520	108.501	71.6655	168.619	58.8867	323.364
112	45	65	82	164	218	279	347	375	459	535	110.843	64.8096	176.249	56.9089	327.201
113	38	68	92	151	223	290	320	384	414	523	108.146	77.8311	180.858	59.082	314.085
114	44	58	115	164	222	268	333	382	451	535	101.795	92.2064	179.895	55.0432	319.705
115	41	93	87	142	211	254	319	382	453	538	107.452	81.2413	163.759	53.0937	324.685
116	38	84	117	154	222	257	308	363	421	536	102.89	102.246	171.87	55.8011	298.027
117	40	85	119	148	221	270	325	364	444	550	101.46	95.5748	180.487	57.9551	307.027
118	35	82	85	155	220	257	303	375	425	548	105.382	91.4989	174.748	53.2471	315.274
119	45	86	126	147	216	281	300	378	464	552	99.4737	95.6519	180.457	56.7427	312.18
120	37	67	104	141	217	260	310	378	416	502	106.322	92.4235	173.934	54.6215	310.768
121	36	82	128	148	203	277	304	379	421	505	102.337	99.6632	177.315	57.0367	300.831
122	39	51	109	153	226	244	318	389	447	529	103.95	90.2008	172.089	50.3229	325.161
123	43	73	101	145	211	241	339	377	421	540	105.277	94.1969	166.119	53.4585	318.14
124	35	54	114	162	224	240	302	388	454	507	101.899	101.474	174.294	49.0035	318.074

125	37	53	117	155	221	260	330	386	419	490	103.053	99.3921	178.499	55.5479	309.806
126	40	82	110	144	205	241	329	389	439	511	103.559	96.9068	162.468	52.2263	318.943
127	45	94	118	146	211	262	315	370	420	500	103.11	98.5821	177.67	57.2125	298.966
128	36	88	120	164	227	287	330	370	462	516	100.895	98.3088	188.503	59.4369	298.285
129	37	90	94	147	228	271	316	384	462	515	107.225	85.6504	174.79	55.2173	311.63
130	42	67	103	152	200	249	333	371	455	512	105.943	88.4283	165.759	51.7433	323.224
131	43	91	86	150	226	267	345	375	437	505	106.63	80.1847	176.675	58.7744	316.173
132	41	88	124	147	221	244	307	388	437	501	101.81	103.493	172.975	53.4564	305.902
133	43	54	129	146	217	240	338	372	416	550	103.89	102.041	172.216	54.4742	308.218
134	40	77	109	157	223	280	320	366	460	502	106.581	93.1637	183.249	56.3087	298.75
135	38	54	113	146	210	246	318	375	442	529	105.156	92.8304	167.739	50.7794	321.512
136	35	83	90	164	206	289	322	364	466	494	111.354	84.4005	177.649	55.8175	299.124
137	39	48	115	154	216	251	345	383	446	508	103.733	89.5117	171.107	52.6461	325.504
138	44	70	87	163	210	280	312	387	418	549	106.122	85.6186	176.538	55.2348	318.186
139	35	84	90	154	215	271	305	387	419	556	104.179	92.5238	174.308	55.087	315.536
140	35	89	114	165	212	276	315	374	441	529	100.485	100.445	182.336	57.2542	304.26
141	41	66	100	159	216	246	350	377	435	537	103.541	92.4076	171.27	53.6212	322.239
142	45	89	94	143	209	244	335	383	466	546	105.833	84.554	160.216	52.1135	328.253
143	41	53	112	146	208	265	335	379	448	537	106.795	81.0013	168.597	53.6542	326.196
144	37	62	122	148	212	253	332	365	425	526	103.815	98.3002	174.596	55.2786	308.196
145	41	66	101	161	205	240	318	363	442	556	104.708	97.4786	169.615	50.3882	317.038
146	43	69	116	149	221	268	309	363	430	541	104.002	95.8717	181.359	55.8298	306.346
147	38	64	95	160	223	241	323	371	459	494	106.17	90.2118	174.234	50.6675	317.579
148	36	75	104	160	217	264	312	385	444	555	101.855	96.61	175.64	53.6666	317.581
149	44	76	102	152	212	287	338	364	464	497	111.66	78.5044	176.022	57.3352	304.777
150	38	64	102	148	214	260	313	390	425	516	105.089	91.798	170.828	53.0371	319.321
151	38	94	100	145	211	264	302	362	443	515	108.423	92.3715	173.89	53.7772	299.262
152	43	90	109	160	209	257	349	383	426	509	101.556	99.8887	174.561	57.9085	308.102
153	39	87	122	141	215	272	343	389	429	545	100.45	95.1614	171.815	59.1977	314.068
154	38	89	120	153	220	251	315	383	414	552	101.672	104.714	175.882	56.0141	301.463
155	42	56	87	152	201	274	321	388	434	545	111.087	70.4851	166.543	52.6985	330.115
156	36	89	120	158	223	270	321	386	426	543	99.9642	102.676	181.893	58.4203	303.004
157	35	81	116	154	230	285	332	383	458	523	99.3573	92.1152	183.292	59.7931	315.061
158	45	65	107	158	212	267	303	388	414	499	104.646	100.819	178.335	54.6094	305.052
159	42	72	94	141	229	256	301	373	436	505	108.436	82.4899	176.148	53.3938	315.941
160	43	91	121	147	218	288	303	390	449	539	100.004	95.9592	179.967	58.0558	309.827
161	38	63	85	154	230	247	339	366	448	502	109.41	74.6219	175.386	53.7408	322.519
162	39	82	125	153	224	282	314	381	445	554	99.7877	98.7669	183.806	58.3997	306.509
163	43	69	106	149	225	250	325	377	430	520	104.126	95.3114	175.276	54.2125	314.126
164	36	58	98	140	222	286	323	385	430	532	111.137	67.9536	174.089	57.3591	323.065
165	43	89	91	145	217	268	322	388	444	509	106.281	81.9847	170.891	55.7448	321.094
166	43	83	105	145	218	267	332	380	469	546	104.419	82.948	170.977	55.9081	323.231
167	39	84	114	163	217	257	302	387	449	514	101.262	103.464	177.544	53.155	308.183
168	38	61	102	158	224	243	326	375	452	525	104.05	90.8935	173.947	51.5177	321.842
169	42	72	126	154	213	285	349	378	454	555	99.7718	93.0401	177.71	59.6849	317.023

170	44	78	98	155	202	287	342	382	463	529	107.045	74.975	169.729	57.3615	325.57
171	39	83	109	147	212	278	350	361	447	524	104.405	83.3465	175.258	59.9717	314.079
172	40	79	118	164	229	275	332	363	425	539	100.814	101.189	190.821	60.2847	297.33
173	41	50	86	160	218	246	311	367	457	522	103.382	92.7726	179.636	51.4861	318.079
174	41	91	121	158	221	290	332	381	425	513	99.5325	99.1354	187.521	62.5397	299.4
175	44	92	96	140	200	248	312	390	460	559	105.663	88.144	156.812	50.6065	327.295
176	40	83	103	140	227	277	333	360	411	544	106.297	85.0646	182.186	61.4189	304.16
177	39	77	97	148	222	282	319	366	452	506	110.612	78.5047	179.032	56.9271	307.305
178	43	60	125	143	204	289	312	363	421	527	105.598	90.2939	179.688	58.107	305.676
179	36	73	116	146	207	287	313	373	445	510	102.975	86.0952	177.338	57.7626	316.652
180	45	84	87	151	214	264	302	367	422	501	107.747	89.2989	177.587	54.7522	307.748
181	42	61	130	153	206	268	325	380	448	492	102.166	98.2498	175.299	54.8906	312.189
182	42	83	126	163	215	281	315	383	434	517	100.048	102.735	184.711	58.3423	301.126
183	35	53	119	159	217	287	326	371	468	493	108.101	89.9528	180.903	55.2362	302.558
184	42	65	125	143	211	285	337	384	439	531	102.745	88.8774	174.139	58.4502	317.878
185	44	66	112	151	219	278	303	369	449	542	105.02	87.8364	180.921	55.3514	312.907
186	39	90	92	146	223	280	338	380	417	537	105.526	83.4823	177.293	60.8315	312.58
187	42	95	104	152	219	284	343	384	449	492	102.829	89.654	177.015	59.7102	310.639
188	37	56	88	163	213	264	318	372	442	515	108.372	77.9422	175.465	52.6907	322.301
189	43	93	118	144	201	256	336	389	466	493	104.842	94.5746	160.864	52.1091	312.588
190	42	79	124	151	223	274	319	382	420	501	101.85	100.878	184.311	59.0509	298.964
191	42	94	113	157	207	240	334	382	412	514	102.568	103.879	170.845	55.933	301.594
192	35	78	125	157	228	263	330	382	417	537	100.606	104.254	183.317	58.8443	300.202
193	39	56	93	149	223	270	318	386	439	547	109.383	72.0807	173.434	53.8775	326.546
194	40	60	93	155	200	243	328	362	417	519	107.548	92.7172	168.157	51.8636	315.288
195	40	86	130	160	218	289	302	385	446	544	98.9241	101.835	185.908	58.1146	302.529
196	41	83	129	151	202	259	346	376	462	516	100.066	96.9081	169.101	55.5552	316.158
197	41	87	121	150	226	241	300	371	461	490	108.271	103.634	175.415	50.3112	287.034
198	37	91	113	155	220	263	349	381	421	523	100.668	99.4233	178.65	60.0371	305.396
199	41	57	113	157	202	264	343	378	438	546	103.497	91.5981	170.189	54.2098	322.616
200	40	79	120	143	214	288	336	389	437	491	101.781	90.1983	176.12	60.0911	313.966
201	40	67	104	162	230	245	331	378	429	514	102.447	100.229	179.026	54.0428	311.928
202	43	58	126	153	216	246	313	364	413	524	104.829	104.693	177.516	54.0129	298.437
203	44	78	115	162	230	244	337	383	419	524	101.713	105.744	180.422	56.6085	302.09
204	42	53	117	152	214	247	341	363	469	550	104.597	87.6469	171.317	52.3827	323.602
205	37	72	98	164	209	253	312	376	457	554	103.287	94.4879	172.086	51.2965	320.608
206	38	77	127	161	213	251	303	380	421	513	102.203	108.006	176.833	54.0156	297.725
207	41	91	119	151	225	266	347	381	432	525	99.8284	98.3934	179.607	60.1471	307.202
208	41	83	91	153	219	240	346	376	455	557	104.212	88.0966	167.47	53.0706	325.609
209	45	65	116	161	205	289	302	386	410	539	103.315	100.28	181.551	57.1678	304.101
210	36	91	104	141	218	279	348	380	418	512	103.614	87.3441	175.358	61.8479	310.464
211	42	70	83	143	202	249	350	363	415	513	112.454	76.0091	164.986	54.898	318.759
212	44	78	125	153	213	289	335	381	412	496	101.757	98.6524	185.793	62.6274	296.539
213	40	69	118	165	225	290	325	365	420	516	101.588	99.1948	193.419	60.9377	296.875
214	44	80	105	160	201	283	318	372	444	509	103.637	91.6977	177.811	56.6737	311.618

215	35	72	114	163	209	252	350	363	470	560	100.792	96.2082	173.207	54.3605	319.171
216	43	51	123	143	226	255	345	371	428	494	104.374	93.5768	177.82	56.4691	311.725
217	39	50	100	141	221	240	333	387	410	505	104.373	97.7954	172.531	54.3894	313.53
218	43	67	129	164	217	272	342	363	428	508	101.348	101.959	187.389	59.6304	297.929
219	44	80	88	146	214	248	302	372	418	510	107.738	92.5691	171.477	52.5328	311.134
220	36	75	110	147	211	276	328	362	430	532	104.63	88.9457	177.28	58.1494	310.165
221	39	85	91	142	207	258	344	388	463	530	108.197	75.4654	158.729	53.6519	332.158
222	38	84	94	157	225	286	342	362	427	495	105.483	83.8327	186.853	62.0412	304.761
223	36	86	129	165	224	262	344	384	456	531	97.6675	103.776	181.341	57.9025	308.77
224	42	79	83	142	217	254	333	390	411	533	108.234	82.9357	166.824	54.6618	321.659
225	38	58	125	150	225	277	340	386	425	556	101.143	94.6179	179.16	58.4979	315.896
226	41	86	117	156	211	252	307	372	469	497	107.893	101.021	172.944	50.7363	293.271
227	45	68	116	151	224	276	318	366	413	544	103.729	96.7953	185.28	58.5534	301.958
228	39	49	126	158	221	249	332	390	455	497	100.979	98.9071	174.287	51.8508	321.299
229	35	60	111	149	203	247	337	390	414	510	104.389	98.5102	165.962	53.4706	315.584
230	37	85	104	159	213	289	326	379	459	495	105.985	91.4369	178.322	56.9845	303.091
231	44	89	108	165	221	247	334	382	466	535	100.228	100.803	176.032	54.0502	314.739
232	45	51	91	151	213	267	317	374	441	532	109.859	74.3052	174.428	53.4357	323.363
233	37	86	129	147	200	259	322	362	421	532	102.317	99.0564	172.867	56.3697	302.317
234	41	95	118	147	207	274	306	371	452	545	101.348	94.8646	175.015	56.1088	309.524
235	40	91	92	165	200	272	311	376	469	507	107.612	93.6369	172.363	52.4722	305.292
236	37	53	124	160	209	272	308	385	450	502	101.921	98.0049	177.223	53.0848	315.673
237	44	82	91	161	219	246	319	370	462	499	107.341	95.4253	174.436	51.3221	307.561
238	43	86	118	145	229	285	310	370	457	522	104.31	92.6782	184.057	57.8697	300.065
239	38	87	91	145	205	257	350	384	433	529	105.95	84.4564	161.993	55.3311	325.075
240	35	77	110	162	228	281	306	369	467	546	101.779	93.683	186.802	56.1137	308.912
241	41	69	121	148	215	243	324	375	455	512	102.869	98.435	170.867	52.2882	315.075
242	36	56	119	159	218	244	338	368	451	537	101.892	98.6796	174.417	52.6682	317.555
243	40	67	115	159	221	275	349	372	434	548	101.457	93.4022	181.17	59.0868	313.648
244	43	83	127	163	224	268	305	372	421	557	100.9	106.544	186.574	57.2148	294.476
245	39	50	82	155	200	249	307	383	422	530	102.929	101.855	174.346	53.2551	311.582
246	45	73	122	153	205	258	321	378	422	532	103.242	101.192	173.505	55.221	305.952
247	38	92	125	158	218	246	304	378	459	532	100.288	104.927	175.296	52.6534	306.087
248	38	76	113	160	228	268	327	378	451	500	100.751	97.0871	183.197	56.6753	311.036
249	37	91	115	140	227	272	346	371	418	538	101.605	93.3979	179.871	62.1465	304.779
250	36	80	100	161	215	263	345	365	449	555	102.446	91.0597	176.002	56.7198	317.325
251	37	81	126	155	216	290	325	364	453	537	99.9673	95.139	185.134	59.8137	305.242
252	35	83	119	161	225	281	323	383	440	548	99.2238	99.8662	184.921	59.0721	306.675
253	43	56	123	147	208	252	328	390	450	491	103.185	96.2439	168.019	51.9506	321.308
254	45	77	83	141	202	255	319	361	468	490	120.803	71.2629	161.878	50.4608	306.999
255	45	79	97	157	220	264	342	380	443	533	103.725	87.8931	175.384	56.4238	319.768
256	36	51	126	158	222	287	302	360	433	490	103.539	96.6954	190.521	56.5715	300.537
257	43	82	97	143	227	273	301	387	457	557	106.348	80.4067	175.546	55.0345	320.306
258	39	69	100	162	202	251	300	373	420	552	105.072	101.156	171.073	51.3723	310.168
259	45	82	127	163	217	279	331	388	416	530	100.003	104.104	184.853	60.7626	298.51

260	40	67	90	146	208	247	316	362	412	540	108.926	87.7118	168.733	52.4154	315.583
261	40	60	102	145	225	281	330	378	448	526	109.647	70.2261	176.614	57.3976	322.309
262	45	64	84	146	204	259	306	375	446	514	113.025	71.4247	166.513	51.0802	325.418
263	39	80	84	165	200	256	334	367	420	501	105.777	94.4455	173.508	55.0365	310.286
264	43	90	122	159	219	283	325	382	429	549	99.5641	100.651	184.552	60.3606	302.055
265	42	51	115	147	217	272	321	381	441	531	106.021	83.5466	174.887	54.6023	321.16
266	39	55	118	147	224	277	348	365	469	557	106.596	74.8223	177.316	58.0421	322.056
267	40	50	86	140	204	249	341	369	465	495	118.688	60.5624	158.342	50.1743	329.867
268	45	67	85	152	216	253	334	362	464	516	112.449	70.3726	171.029	53.031	323.177
269	43	81	109	141	203	259	310	369	462	547	105.753	86.9806	166.445	52.7588	319.58
270	38	78	84	156	220	267	324	367	417	524	107.227	85.2788	179.048	56.8238	311.348
271	37	72	98	160	220	256	329	371	413	525	103.906	98.482	179.066	56.0169	307.183
272	44	70	86	162	230	244	318	387	450	527	102.624	93.0912	177.539	52.0836	320.946
273	45	73	99	157	206	279	330	368	425	544	105.79	86.9779	177.184	57.6298	312.966
274	42	54	122	144	206	240	313	388	460	498	104.225	96.9035	163.98	48.9232	322.8
275	37	69	128	154	226	276	333	363	459	526	100.635	95.6	184.922	58.2618	307.921
276	35	67	101	163	207	253	331	362	462	497	106.121	92.6908	173.128	52.0184	312.939
277	35	71	88	159	213	279	345	362	456	511	110.231	70.3449	176.016	57.6178	319.843
278	39	78	108	142	221	247	310	374	450	505	103.411	93.1943	172.248	52.8661	317.798
279	40	73	125	142	217	286	304	381	449	527	101.935	91.9381	178.986	57.1405	312.864
280	44	70	91	161	224	242	332	371	452	549	105.03	87.5899	173.962	52.1793	322.434
281	36	51	129	154	226	252	324	368	428	539	102.407	102.152	180.121	54.5806	307.013
282	36	82	120	157	215	258	350	360	457	531	100.371	96.9378	177.352	57.2682	310.814
283	39	77	102	140	203	255	323	371	421	516	106.85	90.1619	167.129	54.3984	314.009
284	40	60	93	140	214	257	305	361	421	550	111.378	77.9533	170.877	52.6867	318.036
285	44	74	82	149	222	279	306	384	446	510	111.922	69.6153	175.923	55.1913	320.348
286	40	65	115	152	213	266	331	373	462	513	103.835	89.3329	174.369	54.6312	318.659
287	39	68	119	146	227	283	302	361	438	522	104	91.0018	186.639	57.2423	305.298
288	39	58	126	152	212	283	344	384	420	540	101.583	95.6556	178.008	59.2471	313.23
289	42	61	130	147	203	263	310	385	452	500	102.89	97.8627	170.644	52.6036	315.333
290	41	56	130	159	228	247	310	374	451	537	101.728	104.395	180.165	52.0903	308.255
291	35	76	123	159	200	273	305	386	451	548	100.912	100.06	173.453	53.9188	312.797
292	45	90	129	158	213	265	325	368	450	549	99.6176	101.187	179.744	56.9466	304.313
293	35	75	106	165	213	284	349	366	429	557	101.576	92.6378	182.002	60.5686	311.087
294	45	52	88	163	223	265	327	362	439	548	103.312	89.1757	187.02	56.2781	313.622
295	36	80	122	149	201	256	320	389	470	510	103.058	97.363	164.792	51.4926	315.99
296	44	86	104	158	201	278	318	360	469	538	105.458	87.9736	175.399	55.4241	310.755
297	39	80	118	149	224	288	316	389	435	498	100.889	94.9605	183.123	59.4192	308.806
298	40	71	100	145	214	263	345	386	418	531	105.509	87.0756	169.69	56.4966	320.16
299	37	71	91	152	216	274	302	361	429	502	108.862	82.1073	180.297	55.2505	310.254
300	37	51	90	165	218	245	334	379	414	527	101.098	106.259	182.756	56.8615	303.201
301	40	58	85	153	221	256	313	376	434	519	109.198	77.6481	174.174	52.3703	322.045
302	43	92	126	156	204	246	340	375	433	527	100.585	102.416	170.478	55.753	306.945
303	42	60	123	144	229	283	307	367	449	498	107.453	91.3046	184.78	56.1647	299.094
304	45	52	93	151	220	245	328	364	462	512	111.167	72.7376	171.794	51.2085	325.099

305	45	73	115	151	220	283	327	379	418	556	102.492	94.7816	181.751	59.6751	307.946
306	42	75	125	148	205	272	333	365	447	505	102.536	93.8776	175.626	57.1247	309.721
307	39	77	130	150	203	273	323	362	467	497	106.585	96.0144	174.19	54.2996	296.042
308	43	81	107	142	225	273	330	385	470	553	104.626	80.2177	173.003	56.9664	323.568
309	40	90	103	155	217	284	339	390	433	525	101.055	92.3349	177.531	60.0308	314.783
310	37	54	119	152	226	265	331	380	434	552	102.484	92.409	177.785	55.4243	318.538
311	41	66	130	159	227	265	313	361	418	503	102.94	105.517	189.881	57.305	290.31
312	41	67	112	148	215	268	324	384	425	511	103.781	94.6029	175.37	56.0081	313.144
313	37	59	82	162	207	280	311	374	448	491	112.281	71.328	175.438	53.57	319.027
314	42	68	123	156	215	277	322	378	417	541	102.233	100.51	182.276	58.3622	303.024
315	43	53	126	145	219	279	323	367	450	554	104.763	85.6126	179.153	56.7521	315.674
316	42	88	93	156	201	287	309	369	463	545	107.479	78.9533	174.427	56.1362	316.452
317	44	81	108	151	209	267	307	383	443	544	103.161	95.2369	172.858	54.0678	315.107
318	40	71	129	147	203	259	333	372	466	552	101.492	95.5878	168.718	54.0507	318.335
319	41	60	100	158	210	260	323	388	410	524	104.557	96.2281	172.848	53.8712	315.587
320	43	70	124	148	229	278	309	372	427	514	102.546	98.2252	186.973	57.9996	301.216
321	42	72	122	158	208	280	330	390	456	504	100.346	96.1479	176.272	56.5332	316.784
322	38	48	97	147	205	257	349	366	464	510	113.164	65.4892	164.503	52.621	331.169
323	40	49	83	164	224	287	323	368	425	559	105.646	78.8776	189.82	58.7303	313.943
324	40	73	109	163	226	271	330	372	429	514	101.829	98.2485	185.682	58.0703	305.838
325	40	71	108	153	220	260	346	369	428	510	103.403	94.3062	178.146	57.5749	310.772
326	39	57	117	151	224	255	302	377	450	501	103.322	95.9833	177.455	51.8952	315.408
327	42	86	104	161	204	262	305	366	410	507	105.033	101.652	179.269	55.7006	295.691
328	35	57	96	162	226	278	312	387	440	544	105.931	78.4782	180.071	54.7499	322.657
329	42	78	107	149	209	282	331	385	452	512	104.295	84.0654	172.556	57.2076	320.681
330	35	71	85	144	204	282	305	363	421	502	113.723	70.6092	174.469	56.1002	313.274
331	36	50	117	147	215	276	338	387	453	494	105.786	79.5776	172.707	55.4188	325.64
332	36	67	110	158	223	286	312	363	458	493	108.66	92.2426	185.458	55.9719	294.081
333	45	72	104	159	212	277	317	361	430	555	104.606	91.6478	181.328	56.8532	308.956
334	45	56	83	146	207	245	333	364	438	560	110.888	74.644	166.518	51.7647	327.101
335	45	64	124	159	205	257	332	360	437	491	103.714	100.353	178.347	55.2951	303.235
336	40	51	99	144	230	286	313	384	422	542	110.298	70.5246	179.381	57.0127	319.888
337	37	82	94	149	200	250	336	363	451	492	108.018	85.5312	165.301	52.9946	317.204
338	37	61	107	154	206	256	339	379	422	551	103.817	94.4791	169.201	53.9697	320.055
339	36	71	101	148	224	282	331	379	413	509	105.535	86.4062	181.371	59.9648	309.356
340	38	62	86	165	215	273	350	382	424	511	107.068	78.1639	176.372	56.8479	322.058
341	37	68	113	146	205	285	312	382	466	529	106.297	82.0326	171.128	54.8499	320.365
342	44	80	95	142	211	252	307	372	426	533	107.328	89.6304	169.102	52.8427	315.154
343	42	52	119	153	209	261	325	385	438	527	103.341	94.8597	171.719	52.8737	320.49
344	45	92	122	157	213	268	310	371	445	501	101.342	100.721	181.005	56.0181	301.165
345	42	77	122	158	223	251	307	365	430	543	102.582	104.649	181.095	54.3297	299.522
346	37	80	82	150	229	260	339	379	420	559	107.037	80.3064	174.12	56.7407	320.435
347	40	87	113	153	212	260	313	369	458	533	102.036	96.7752	175.351	54.3547	311.074
348	35	80	115	163	206	269	349	373	414	516	101.829	100.604	179.986	60.1736	300.862
349	36	82	94	148	205	274	337	374	444	534	107.371	78.2265	168.209	56.6848	322.229

350	45	81	87	162	200	249	342	374	432	526	105.107	92.5792	167.952	53.4495	319.365
-----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---------	---------	---------	---------	---------

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

ANEXO B: VARIABLES USADAS EN EL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA LA CREACIÓN DE LA RNA EN MATLAB.

Variables de la Red Neuronal Artificial Programada	
Variable	Descripción
T	Matriz que contienen las temperaturas a las que hay %VAP en el crudo a tratar, esta es la entrada en la RNA.
T_Norm	Matriz que contiene las entradas normalizadas para el diseño de la RNA
salidas	Matriz que contienen las los flujos volumétricos de los productos después del proceso.
salidas_norm_red	Salidas de la RNA normalizadas para facilitar el adiestramiento de la RED
x	Variable a la que se le asigna la matriz de entradas para el diseño y adiestramiento de RNA.
t	Variable a la que se le asigna la matriz de salidas para el diseño y adiestramiento de RNA.
trainFcn	Indica la función algorítmica utilizada para el adiestramiento de la red.
hiddenLayerSize	Designa el número de neuronas en la capa oculta que serán consideradas en la estructura de la red
Realizado por: OSORIO, Julián 2024.	

ANEXO C: CÓDIGO PARA EL DISEÑO, ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DE LA RNA EN MATLAB.

```
1 %-----DISEÑO DE LA RNA-----
2
3 %Leer Tabla Desde la Hoja de Excel
4 Extraer=readtable('basedatos.xlsx','Sheet','data_1');
5
6 %Convertir la tabla a Matriz Numérica
7 Datos = table2array(Extraer);
8
9 %Parámetro de Entrada Temperatura %VAP
10 T=Datos(1:325,1:10);
11 T_Norm=normalize(T(:,1:end),'range');
12 %Parámetro de Salida Flujos volumétricos
13 salidas=Datos(1:325,11:15);
14 salidas_norm_red=normalize(salidas(:,1:end),'range');
15
16 %LN_norm =normalize(salidas(1:end,1),'range'); %copiar para todas
17 LN_max=max(salidas(1:end,1));
18 LN_min=min(salidas(1:end,1));
19 %HN_norm =normalize(salidas(1:end,2),'range');
20 HN_max=max(salidas(1:end,2));
21 HN_min=min(salidas(1:end,2));
22 %LD_norm =normalize(salidas(1:end,3),'range');
23 LD_max=max(salidas(1:end,3));
24 LD_min=min(salidas(1:end,3));
25 %HD_norm =normalize(salidas(1:end,4),'range');
26 HD_max=max(salidas(1:end,4));
27 HD_min=min(salidas(1:end,4));
28 %R_norm =normalize(salidas(1:end,5),'range');
29 R_max=max(salidas(1:end,5));
30 R_min=min(salidas(1:end,5));
31
32 % Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
33 % Script generated by Neural Fitting app
34 % Created 26-Feb-2024 12:19:01
35 %
36 % This script assumes these variables are defined:
37 %
38 %   T_Norm - input data.
39 %   salidas_norm_red - target data.
40
41 x = T_Norm';
42 t = salidas_norm_red';
43
44 % Choose a Training Function
45 % For a list of all training functions type: help nntain
46 % 'trainlm' is usually fastest.
47 % 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
48 % 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
49 trainFcn = 'trainbr'; % Bayesian Regularization backpropagation.
50
51 % Create a Fitting Network
52 hiddenLayerSize = 20;
```



```

53 net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

54 % Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
55 % For a list of all processing functions type: help nprocess
56 net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
57 net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
58
59 % Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
60 % For a list of all data division functions type: help nndivision
61 net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
62 net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
63 net.divideParam.trainRatio = 70/100;
64 net.divideParam.valRatio = 15/100;
65 net.divideParam.testRatio = 15/100;
66
67 % Choose a Performance Function
68 % For a list of all performance functions type: help nnperformance
69 net.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
70
71 % Choose Plot Functions
72 % For a list of all plot functions type: help nnplot
73 net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
74   'plotregression', 'plotfit'};
75
76 % Train the Network
77 [net,tr] = train(net,x,t);
78
79 % Test the Network
80 y = net(x);
81 e = gsubtract(t,y);
82 performance = perform(net,t,y)
83
84 % Recalculate Training, Validation and Test Performance
85 trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
86 valTargets = t .* tr.valMask{1};
87 testTargets = t .* tr.testMask{1};
88 trainPerformance = perform(net,trainTargets,y)
89 valPerformance = perform(net,valTargets,y)
90 testPerformance = perform(net,testTargets,y)
91
92 % View the Network
93 view(net)
94
95 % Plots
96 % Uncomment these lines to enable various plots.
97 %figure, plotperform(tr)
98 %figure, plottrainstate(tr)
99 %figure, ploterrhist(e)
100 %figure, plotregression(t,y)
101 %figure, plotfit(net,x,t)
102
103 % Deployment
104 % Change the (false) values to (true) to enable the following code blocks.
105 % See the help for each generation function for more information.
106 if (false)
107     % Generate MATLAB function for neural network for application
108     % deployment in MATLAB scripts or with MATLAB Compiler and Builder
109     % tools, or simply to examine the calculations your trained neural

```

```

110 % network performs.
111 genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction');
112 y = myNeuralNetworkFunction(x);
113 end
114 if (false)
115 % Generate a matrix-only MATLAB function for neural network code
116 % generation with MATLAB Coder tools.
117 genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction','MatrixOnly','yes');
118 y = myNeuralNetworkFunction(x);
119 end
120 if (false)
121 % Generate a Simulink diagram for simulation or deployment with.
122 % Simulink Coder tools.
123 gensim(net);
124 end
125
126 %-----EJECUCIÓN DE LA RNA-----
127
128 LN_max=120.8030;
129 LN_min=97.6675;
130
131 HN_max=108.0060;
132 HN_min=57.6498;
133
134 LD_max=193.4190;
135 LD_min=156.8120;
136
137 HD_max=62.6274;
138 HD_min=48.9232;
139
140 R_max=332.1580;
141 R_min=287.0340;
142
143 load ('ARN_OIL_T.mat');
144
145 Extraer=readtable('basedatos.xlsx','Sheet','data_1');
146 Datos = table2array(Extraer);
147 T=Datos(1:325,1:10);
148 T_Norm=normalize(T(:,1:end),'range');
149
150 net(T_Norm);
151
152 ans_1=ans';
153
154 i=1;
155 while i<326;
156 LN(i,1)=(ans_1(i,1)*(LN_max-LN_min))+LN_min;
157 HN(i,1)=(ans_1(i,2)*(HN_max-HN_min))+HN_min;
158 LD(i,1)=(ans_1(i,3)*(LD_max-LD_min))+LD_min;
159 HD(i,1)=(ans_1(i,4)*(HD_max-HD_min))+HD_min;
160 R(i,1)=(ans_1(i,5)*(R_max-R_min))+R_min;
161 i=i+1;
162
163 end
164
165 PREDICCIONES=([LN HN LD HD R]);
166
167 %-----GRÁFICAS DE PREDICHO VS EXPERIMENTAL-----

```

```
168
169 clc
170 clear
171 %CAMBIAR F_R y F_P para comparación
172 Extraer=readtable('basedatos.xlsx','Sheet','VALIDACION_EXTERNA');
173 Datos = table2array(Extraer);
174 F_R=Datos(1:25,5);
175 F_P=Datos(1:25,11);
176 x=(1:1:25)';
177 Y_1=F_R;
178
179 plot(x,Y_1,"k");
180 title("Gráfica de ejemplo")
181 xlabel("Número de pruebas")
182 ylabel("Flujo volumétrico (RESIDUE)")
183 grid on
184 grid minor
185
186 hold on
187 Y_2=F_P;
188 plot(x,Y_2,"--or");
189
190 legend("RESIDUE (DWSIM)","RESIDUE (RNA)")
191 title("Predicción del Flujo Volumétrico de RESIDUE en la validación externa")
192
193 hold off
```

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

ANEXO D: ERRORES PORCENTUALES REGISTRADOS EN EL ADIESTRAMIENTO DE LA RNA.

Salidas de la Red Neuronal Artificial															
Predicción N°	LN (DWSIM)	LN (Predicho)	% Error	HN (DWSIM)	HN (Predicho)	% Error	LD (DWSIM)	LD (Predicho)	% Error	HD (DWSIM)	HD (Predicho)	% Error	RESIDUE (DWSIM)	RESIDUE (Predicho)	% Error
1	116.003	116.051512	0.04182	57.7841	57.6472321	0.23686	175.079	175.107744	0.01642	57.1598	57.1064268	0.09338	323.635	322.90016	0.22706
2	104.611	104.340404	0.25867	86.4991	88.0568508	1.80089	178.569	179.073905	0.28275	55.2682	55.4308008	0.29420	316.517	315.540918	0.30838
3	106.54	106.460546	0.07458	81.787	81.8663058	0.09697	173.397	173.713283	0.18240	50.4225	50.4347334	0.02426	325.766	325.84362	0.02383
4	102.473	102.485162	0.01187	95.751	95.642456	0.11336	184.278	184.146995	0.07109	61.4891	61.4729829	0.02621	301.826	301.261332	0.18708
5	102.26	102.257604	0.00234	100.536	100.662117	0.12544	183.506	183.902223	0.21592	54.1695	53.9789946	0.35168	307.753	307.373366	0.12336
6	110.115	110.103472	0.01047	71.9441	72.0210627	0.10698	175.9441	175.511261	0.24601	55.7145	55.8149424	0.18028	322.117	321.827651	0.08983
7	101.562	101.514266	0.04700	94.5701	94.5825644	0.01318	170.721	170.588968	0.07734	53.7682	53.7527675	0.02870	321.245	321.405163	0.04986
8	106.593	106.657088	0.06012	78.8705	79.697916	1.04908	176.61	176.348082	0.14830	52.7704	52.7118599	0.11093	322.698	323.082737	0.11922
9	105.549	105.736376	0.17752	86.8618	86.8260755	0.04113	178.107	178.267617	0.09018	53.093	52.9550799	0.25977	318.649	318.861115	0.06657
10	102.2	102.174604	0.02485	92.6749	93.06567	0.42166	170.432	170.851373	0.24606	58.6795	58.7118016	0.05505	312.88	312.224642	0.20946
11	105.642	105.792426	0.14239	93.5475	93.3204376	0.24272	172.669	172.487392	0.10518	53.424	53.3406906	0.15594	314.144	314.15223	0.00262
12	102.413	102.486146	0.07142	94.5621	94.6640272	0.10779	188.166	188.377556	0.11243	59.428	59.3140869	0.19168	306.179	306.304352	0.04094
13	102.814	102.77903	0.03401	94.7707	94.2432908	0.55651	179.559	179.603002	0.02451	61.1949	61.2880434	0.15221	306.394	306.358121	0.01171
14	107.895	107.810503	0.07831	97.3525	96.4140398	0.96398	177.327	176.887149	0.24804	49.6356	49.6247522	0.02185	305.24	306.317217	0.35291
15	102.946	102.775818	0.16531	98.2054	98.7375974	0.54192	171.24	171.206867	0.01935	57.152	57.0652365	0.15181	311.016	310.731015	0.09163
16	103.462	103.479773	0.01718	97.7364	97.3607185	0.38438	172.01	171.98087	0.01694	52.8097	52.8154045	0.01080	313.176	312.87772	0.09524
17	102.742	102.671225	0.06889	93.9304	93.9840576	0.05712	171.512	172.081098	0.33181	56.2633	56.2841758	0.03710	308.244	308.362783	0.03854
18	112.443	112.232372	0.18732	66.7794	66.7820606	0.00398	173.992	173.865413	0.07275	56.2737	56.4274283	0.27318	320.937	320.514276	0.13172
19	107.701	107.622018	0.07333	88.488	88.0150191	0.53451	171.663	171.748622	0.04988	50.6966	50.5130539	0.36205	317.491	317.239244	0.07930
20	112.153	112.295747	0.12728	69.3207	69.2532816	0.09726	181.058	181.322589	0.14613	58.6531	58.7143557	0.10444	313.761	313.861843	0.03214
21	101.277	101.245333	0.03127	102.49	102.02555	0.45317	178.862	178.99174	0.07254	54.5615	54.6268172	0.11971	310.004	309.553391	0.14536
22	104.769	104.381702	0.36967	87.2441	88.0587515	0.93376	175.145	175.210121	0.03718	55.3974	55.4014142	0.00725	317.053	317.34659	0.09260
23	102.992	102.755593	0.22954	96.0814	96.30977	0.23768	172.062	171.945434	0.06775	52.328	52.2456573	0.15736	316.433	316.78754	0.11204
24	103.377	103.127135	0.24170	88.0646	88.3197303	0.28971	173.205	173.300401	0.05508	55.8432	55.8526401	0.01690	318.943	319.501763	0.17519
25	105.952	106.036437	0.07969	91.7781	91.0125188	0.83417	172.413	171.999382	0.23990	54.2169	54.1498564	0.12366	314.793	315.549334	0.24026
26	109.013	109.017909	0.00450	79.7403	80.3977758	0.82452	170.693	171.224547	0.31141	54.5779	54.800822	0.40845	320.913	319.597711	0.40986
27	101.687	101.479401	0.20416	100.258	100.505312	0.24668	176.571	176.264053	0.17384	58.4346	58.4478305	0.02264	305.198	305.41038	0.06959
28	101.86	101.751446	0.10657	92.1081	92.7766351	0.72582	171.899	171.719304	0.10454	52.9494	53.106303	0.29633	324.861	324.234746	0.19278
29	104.726	104.695297	0.02932	89.0741	89.8992567	0.92637	174.171	174.370084	0.11430	55.7467	55.7345478	0.02180	316.772	316.370599	0.12672
30	105.016	104.97406	0.03994	81.5215	82.2920341	0.94519	177.74	178.163556	0.23830	56.4429	56.5675609	0.22086	320.613	319.983296	0.19641

31	103.621	103.497756	0.11894	105.916	105.793022	0.11611	179.074	179.508137	0.24243	53.2988	53.3913042	0.17356	301.307	301.801289	0.16405
32	103.945	103.582755	0.34850	97.6991	99.1875197	1.52347	177.567	177.80388	0.13340	55.9428	56.2268166	0.50769	298.559	298.504284	0.01833
33	111.015	110.941666	0.06606	79.2361	79.4590577	0.28138	171.602	171.304097	0.17360	54.9137	54.9318241	0.03300	311.876	312.072389	0.06297
34	103.652	103.515546	0.13165	99.5418	98.8788267	0.66603	175.978	176.131137	0.08702	52.0718	52.0619334	0.01895	309.389	309.524021	0.04364
35	109.371	109.602766	0.21191	74.4459	74.5865844	0.18898	164.697	164.05985	0.38686	50.8224	50.7799168	0.08359	332.105	332.668216	0.16959
36	102.148	102.207201	0.05796	89.1698	88.933879	0.26458	177.495	177.564835	0.03934	61.4001	61.3680557	0.05219	310.407	310.722158	0.10153
37	116.899	116.689298	0.17939	57.6498	57.6285312	0.03689	171.374	171.116929	0.15001	54.2134	54.0239311	0.34949	326.53	326.678758	0.04556
38	104.479	104.709518	0.22064	92.1528	91.4296555	0.78472	167.956	168.159593	0.12122	52.8646	52.8652084	0.00115	315.787	315.356872	0.13621
39	101.554	101.626478	0.07137	95.8761	95.9034876	0.02857	180.101	179.922994	0.09884	55.6697	55.6508732	0.03382	309.913	309.706603	0.06660
40	103.456	103.406386	0.04796	92.4549	92.829828	0.40553	170.582	170.591155	0.00537	53.749	53.8138318	0.12062	317.156	317.099356	0.01786
41	106.252	106.01053	0.22726	77.0414	78.0559545	1.31690	175.988	176.006915	0.01075	56.0154	56.1825917	0.29847	325.913	325.784963	0.03929
42	111.812	112.034857	0.19931	71.4096	71.1266432	0.39624	170.904	170.734128	0.09940	52.221	52.18732	0.06450	324.439	324.373177	0.02029
43	101.639	101.694397	0.05450	96.3555	96.0769352	0.28910	178.655	178.476359	0.09999	57.9609	57.8922927	0.11837	307.863	307.649952	0.06920
44	102.699	102.797971	0.09637	89.0543	88.8269964	0.25524	176.432	176.345159	0.04922	60.6238	60.6914823	0.11164	307.288	307.508652	0.07181
45	109.944	109.826578	0.10680	73.9045	74.4956799	0.79992	181.363	181.215958	0.08108	58.417	58.4348965	0.03064	311.005	310.747374	0.08284
46	104.223	103.972503	0.24035	86.0577	86.319959	0.30475	168.651	168.494077	0.09305	54.4084	54.4916673	0.15304	326.84	327.062192	0.06798
47	105.824	106.01471	0.18021	84.2758	83.6502179	0.74230	172.838	172.643783	0.11237	51.1026	51.0113246	0.17861	325.347	325.82833	0.14794
48	108.349	108.428018	0.07293	75.6987	75.5527659	0.19278	177.016	177.37296	0.20165	55.896	55.6677698	0.40831	321.463	321.657862	0.06062
49	102.165	102.480789	0.30910	91.3307	92.2078056	0.96036	178.345	178.788303	0.24857	56.6015	56.6952984	0.16572	318.949	317.239583	0.53595
50	109.506	109.66705	0.14707	77.9799	78.1380528	0.20281	180.345	177.989552	1.30608	59.3885	59.2983853	0.15174	307.743	307.041228	0.22804
51	109.693	109.561502	0.11988	69.7061	69.311014	0.56679	174.978	174.91824	0.03415	57.5197	57.5716917	0.09039	322.274	322.401627	0.03960
52	102.663	102.789455	0.12317	100.925	100.775066	0.14856	177.032	175.484299	0.87425	55.7071	55.7143063	0.01294	303.329	302.426034	0.29769
53	102.373	102.170684	0.19763	94.5082	94.4867535	0.02269	175.572	175.780096	0.11852	56.7097	56.7142769	0.00807	313.715	313.913543	0.06329
54	104.006	103.065312	0.90446	99.8178	101.49857	1.68384	173.611	173.915472	0.17538	53.5762	53.9421613	0.68307	300.191	300.937855	0.24879
55	101.101	101.294748	0.19164	97.4837	97.2266572	0.26368	179.581	179.818714	0.13237	58.2347	58.3345137	0.17140	309.453	308.759442	0.22412
56	103.531	103.39511	0.13126	101.053	100.914376	0.13718	180.41	180.123571	0.15877	54.8922	54.7894157	0.18725	304.418	304.84763	0.14113
57	102.293	102.374988	0.08015	91.9408	91.7558238	0.20119	167.592	167.497874	0.05616	54.603	54.6810438	0.14293	318.483	318.784661	0.09472
58	112.127	112.564725	0.39038	69.865	69.6650276	0.28623	176.633	175.791052	0.47667	60.9577	60.8637177	0.15418	311.713	311.593627	0.03830
59	101.05	101.111076	0.06044	99.2295	98.7871889	0.44575	165.477	165.303051	0.10512	52.2461	52.2064011	0.07598	320.805	320.542491	0.08183
60	102.035	102.05544	0.02003	89.4975	89.340404	0.17553	174.208	174.308934	0.05794	58.627	58.6735387	0.07938	314.729	314.681962	0.01495

61	112.533	112.214395	0.28312	67.1233	67.8084739	1.02077	180.625	180.893258	0.14852	57.2529	57.3370392	0.14696	316.749	317.236962	0.15405
62	103.616	103.720382	0.10074	92.6408	92.0715685	0.61445	169.662	169.669331	0.00432	55.1967	55.2833315	0.15695	317.848	318.158589	0.09772
63	112.593	113.06161	0.41620	69.2572	68.4959996	1.09909	174.771	174.516975	0.14535	57.3039	57.4166638	0.19678	318.01	317.86566	0.04539
64	111.147	111.505274	0.32234	84.6945	83.7352769	1.13257	181.1	181.25694	0.08666	54.8187	54.7353467	0.15205	301.889	301.322187	0.18776
65	109.97	110.29996	0.30005	79.4481	79.2612085	0.23524	173.549	173.214874	0.19253	55.1603	55.1273017	0.05982	316.03	316.297388	0.08461
66	104.278	104.435631	0.15116	90.0482	90.4655807	0.46351	169.276	169.346508	0.04165	53.0026	52.9928691	0.01836	320.494	319.968492	0.16397
67	106.059	106.057004	0.00188	87.8777	88.3767379	0.56788	163.833	163.878898	0.02802	53.3039	53.3285423	0.04623	322.68	322.658492	0.00667
68	101.451	101.814355	0.35816	105.763	105.053102	0.67122	181.685	181.472018	0.11723	54.8717	54.8050729	0.12142	296.263	295.289374	0.32864
69	109.346	109.245746	0.09169	78.7773	79.9378918	1.47326	172.328	171.91755	0.23818	57.2585	57.3370079	0.13711	314.901	315.070194	0.05373
70	110.66	110.846718	0.16873	89.9601	88.6294037	1.47921	173.546	173.765339	0.12639	50.2823	50.300696	0.03659	307.471	307.230593	0.07819
71	105.23	105.252799	0.02167	81.0586	80.6289234	0.53008	173.858	173.691952	0.09551	55.2953	55.2789777	0.02952	324.489	325.472309	0.30303
72	104.245	104.448274	0.19500	88.1769	88.2177039	0.04628	172.266	172.086169	0.10439	54.7383	54.768797	0.05571	319.781	319.278575	0.15712
73	110.118	110.154426	0.03308	68.7691	68.8596159	0.13162	166.557	166.703361	0.08787	53.9983	54.2132027	0.39798	331.942	331.485445	0.13754
74	104.62	104.678609	0.05602	87.4262	87.0798101	0.39621	179.849	180.020115	0.09514	58.4827	58.4483455	0.05874	314.217	314.266944	0.01589
75	99.3411	99.1311837	0.21131	102.24	102.265069	0.02452	173.199	173.02449	0.10076	54.639	54.519116	0.21941	309.994	310.201466	0.06693
76	102.069	101.85721	0.20750	99.1844	99.2245922	0.04052	184.175	184.347622	0.09373	58.5965	58.5432269	0.09092	303.306	303.602381	0.09772
77	104.36	104.191215	0.16173	95.1225	94.8523608	0.28399	175.81	175.859099	0.02793	53.9391	53.9421083	0.00558	310.239	310.510464	0.08750
78	103.026	102.907701	0.11482	90.7519	90.679657	0.07960	171.613	171.578479	0.02012	58.0245	58.0979387	0.12657	311.435	311.778688	0.11036
79	103.605	103.514533	0.08732	97.8791	97.8686217	0.01071	167.573	167.023037	0.32819	53.9341	54.0028801	0.12753	314.053	314.47424	0.13413
80	100.693	100.760377	0.06691	101.871	102.593243	0.70898	179.949	180.108527	0.08865	53.0284	53.1392948	0.20912	311.926	311.234379	0.22173
81	102.625	102.82691	0.19675	91.4279	90.7119177	0.78311	174.441	174.461582	0.01180	58.0808	58.0603513	0.03521	311.815	312.095746	0.09004
82	102.02	102.134148	0.11189	98.2973	98.4204613	0.12529	172.146	171.853426	0.16996	52.8462	52.7531145	0.17614	314.057	314.05565	0.00043
83	102.867	102.763961	0.10017	94.6797	94.5547737	0.13195	175.395	175.395965	0.00055	59.5663	59.6781962	0.18785	308.762	308.797577	0.01152
84	106.95	107.455089	0.47227	84.4049	84.0784383	0.38678	176.742	176.999554	0.14572	57.6117	57.5621898	0.08594	306.385	305.513845	0.28433
85	102.747	102.660494	0.08419	94.0002	93.855052	0.15441	163.969	164.191494	0.13569	52.4444	52.4009729	0.08281	321.762	322.19166	0.13353
86	106.978	106.827696	0.14050	92.2864	91.4566232	0.89913	169.597	169.577315	0.01161	51.3325	51.3471296	0.02850	314.745	314.934557	0.06023
87	102.409	102.978483	0.55609	101.414	99.9566385	1.43704	178.587	178.296645	0.16258	53.8444	53.8983358	0.10017	311.598	311.566332	0.01016
88	101.202	100.983456	0.21595	100.907	100.785827	0.12008	181.063	181.227808	0.09102	55.44	55.5146171	0.13459	312.534	312.850912	0.10140
89	102.923	102.912018	0.01067	102.129	102.711327	0.57019	166.869	166.98488	0.06944	52.8728	52.8702685	0.00479	310.361	310.350081	0.00352
90	102.575	102.40962	0.16123	104.489	105.352769	0.82666	178.031	177.802144	0.12855	51.5548	51.4646258	0.17491	307.726	307.995012	0.08742

91	106.073	106.205063	0.12450	81.285	81.8631108	0.71121	162.686	162.944692	0.15901	53.8663	53.9499036	0.15521	326.327	326.03346	0.08995
92	99.0196	99.2865802	0.26962	101.907	101.764844	0.13950	175.648	175.590981	0.03246	55.7292	55.8558832	0.22732	313.704	313.446764	0.08200
93	100.152	100.178243	0.02620	90.4517	89.7672428	0.75671	178.55	178.350425	0.11178	59.1892	59.1052577	0.14182	317.711	317.647364	0.02003
94	106.085	106.224841	0.13182	86.499	86.8481633	0.40366	177.998	178.223211	0.12652	55.4623	55.474041	0.02117	315.247	315.36071	0.03607
95	101.953	102.053575	0.09865	104.192	104.444322	0.24217	174.006	174.273984	0.15401	55.7671	55.9161099	0.26720	298.561	298.729612	0.05647
96	104.134	104.22943	0.09164	94.0061	93.5940861	0.43828	169.871	169.800229	0.04166	53.6719	53.6139159	0.10803	316.228	316.044887	0.05791
97	113.497	113.07397	0.37272	67.87	67.0390161	1.22438	173.471	173.642664	0.09896	53.9	54.050181	0.27863	320.183	320.96655	0.24472
98	100.056	100.012193	0.04378	100.828	100.447529	0.37735	182.067	182.016526	0.02772	58.0478	57.9590239	0.15294	303.686	303.611119	0.02466
99	103.539	103.817269	0.26876	95.7494	95.2599055	0.51122	173.321	173.201248	0.06909	54.1579	54.1671555	0.01709	317.233	316.84758	0.12149
100	104.707	105.01393	0.29313	87.3058	87.1807505	0.14323	170.63	170.218624	0.24109	52.4622	52.4820954	0.03792	325.751	324.931674	0.25152
101	102.179	102.202307	0.02281	103.538	103.524297	0.01323	178.67	178.380998	0.16175	57.0269	56.8828188	0.25265	300.275	300.178679	0.03208
102	107.897	107.818289	0.07295	76.0885	76.8863049	1.04852	171.14	170.947469	0.11250	57.2396	57.1520342	0.15298	320.677	320.738011	0.01903
103	102.804	102.677142	0.12340	96.4593	96.3668166	0.09588	176.549	176.60363	0.03094	58.0687	58.012954	0.09600	310.955	310.911366	0.01403
104	105.306	105.437811	0.12517	88.5034	88.3043629	0.22489	175.199	175.487042	0.16441	55.5565	55.9224332	0.65867	317.869	317.27249	0.18766
105	111.974	111.952891	0.01885	77.271	77.4232456	0.19703	163.627	163.562471	0.03944	50.4131	50.5019961	0.17634	323.884	323.734284	0.04623
106	103.847	104.042095	0.18787	95.21	94.6694145	0.56778	175.47	175.407321	0.03572	55.2887	55.1918256	0.17522	311.843	311.814468	0.00915
107	102.506	102.400264	0.10315	106.727	107.031952	0.28573	179.052	179.450279	0.22244	51.4188	51.6114997	0.37477	305.777	305.396829	0.12433
108	101.833	102.369548	0.52689	100.087	101.124043	1.03614	171.139	171.538953	0.23370	57.7086	57.8173579	0.18846	306.379	305.302224	0.35145
109	105.834	106.262879	0.40524	84.0069	83.827904	0.21307	180.19	181.117244	0.51459	57.9964	57.9265804	0.12039	315.58	313.898189	0.53293
110	102.3	102.303733	0.00365	93.278	92.9071514	0.39757	180.421	180.70974	0.16004	58.9531	59.1312195	0.30214	307.057	307.408249	0.11439
111	108.501	108.440161	0.05607	71.6655	71.3645799	0.41990	168.619	169.159839	0.32075	58.8867	58.6981488	0.32019	323.364	323.71339	0.10805
112	110.843	110.567136	0.24888	64.8096	64.6146128	0.30086	176.249	176.272351	0.01325	56.9089	56.8292648	0.13993	327.201	327.174173	0.00820
113	108.146	108.449634	0.28076	77.8311	77.2372991	0.76294	180.858	181.281112	0.23395	59.082	59.1572014	0.12728	314.085	314.037418	0.01515
114	101.795	101.838743	0.04297	92.2064	93.1384714	1.01085	179.895	179.952702	0.03208	55.0432	54.9820801	0.11104	319.705	319.388292	0.09906
115	107.452	107.425176	0.02496	81.2413	81.7152752	0.58342	163.759	163.668728	0.05513	53.0937	53.0653382	0.05342	324.685	324.833945	0.04587
116	102.89	102.818364	0.06962	102.246	102.188239	0.05649	171.87	172.180339	0.18057	55.8011	55.7713434	0.05333	298.027	297.952151	0.02511
117	101.46	101.502221	0.04161	95.5748	95.2933358	0.29450	180.487	180.200164	0.15892	57.9551	58.0099587	0.09466	307.027	306.99969	0.00889
118	105.382	105.287	0.09015	91.4989	91.6048734	0.11582	174.748	174.524133	0.12811	53.2471	53.0802026	0.31344	315.274	314.667943	0.19223
119	99.4737	100.130366	0.66014	95.6519	95.5476559	0.10898	180.457	179.36431	0.60551	56.7427	56.490345	0.44474	312.18	311.407322	0.24751
120	106.322	106.511542	0.17827	92.4235	92.2872054	0.14747	173.934	173.894265	0.02284	54.6215	54.5756356	0.08397	310.768	310.500986	0.08592

121	102.337	102.146026	0.18661	99.6632	99.2147045	0.45001	177.315	177.284946	0.01695	57.0367	57.0762384	0.06932	300.831	301.624815	0.26387
122	103.95	103.883083	0.06437	90.2008	90.9039833	0.77958	172.089	172.028072	0.03540	50.3229	50.4283994	0.20964	325.161	324.985246	0.05405
123	105.277	105.208536	0.06503	94.1969	93.997707	0.21146	166.119	165.980868	0.08315	53.4585	53.4500096	0.01588	318.14	318.377561	0.07467
124	101.899	101.808636	0.08868	101.474	101.45449	0.01923	174.294	174.003902	0.16644	49.0035	49.1660103	0.33163	318.074	318.706914	0.19898
125	103.053	103.141644	0.08602	99.3921	99.3016493	0.09100	178.499	178.366924	0.07399	55.5479	55.4821694	0.11833	309.806	309.938591	0.04280
126	103.559	103.550054	0.00864	96.9068	97.0749694	0.17354	162.468	162.882208	0.25495	52.2263	52.2622208	0.06878	318.943	318.118783	0.25842
127	103.11	103.101294	0.00844	98.5821	99.1126647	0.53820	177.67	177.813729	0.08090	57.2125	57.1776653	0.06089	298.966	298.864098	0.03408
128	100.895	100.702798	0.19050	98.3088	98.9333254	0.63527	188.503	188.606712	0.05502	59.4369	59.4569965	0.03381	298.285	298.32984	0.01503
129	107.225	107.274023	0.04572	85.6504	85.3454377	0.35605	174.79	175.067687	0.15887	55.2173	55.3615634	0.26126	311.63	311.552411	0.02490
130	105.943	105.816568	0.11934	88.4283	89.0017743	0.64852	165.759	165.721405	0.02268	51.7433	51.6621965	0.15674	323.224	323.03447	0.05864
131	106.63	106.451977	0.16695	80.1847	81.0174721	1.03857	176.675	176.394061	0.15901	58.7744	58.6819386	0.15732	316.173	316.427889	0.08062
132	101.81	101.645488	0.16159	103.493	102.691142	0.77479	172.975	173.252438	0.16039	53.4564	53.5176552	0.11459	305.902	305.92788	0.00846
133	103.89	103.944056	0.05203	102.041	102.716606	0.66209	172.216	172.387326	0.09948	54.4742	54.4343734	0.07311	308.218	308.115764	0.03317
134	106.581	106.682614	0.09534	93.1637	93.4226946	0.27800	183.249	183.063048	0.10148	56.3087	56.1666294	0.25231	298.75	298.319974	0.14394
135	105.156	105.419612	0.25069	92.8304	92.4812805	0.37608	167.739	167.431758	0.18317	50.7794	50.7341245	0.08916	321.512	321.168573	0.10682
136	111.354	111.468508	0.10283	84.4005	83.3898387	1.19746	177.649	177.287872	0.20328	55.8175	55.7123159	0.18844	299.124	299.909279	0.26253
137	103.733	103.675026	0.05589	89.5117	89.7014817	0.21202	171.107	170.463308	0.37619	52.6461	52.6633166	0.03270	325.504	326.158706	0.20114
138	106.122	106.193057	0.06696	85.6186	85.4566495	0.18915	176.538	177.050022	0.29004	55.2348	55.2603911	0.04633	318.186	318.06912	0.03673
139	104.179	104.120168	0.05647	92.5238	92.3766976	0.15899	174.308	174.365728	0.03312	55.087	55.0518052	0.06389	315.536	315.724942	0.05988
140	100.485	100.36605	0.11838	100.445	100.484287	0.03911	182.336	182.565846	0.12606	57.2542	57.184057	0.12251	304.26	304.146599	0.03727
141	103.541	103.244822	0.28605	92.4076	92.6857038	0.30095	171.27	170.999544	0.15791	53.6212	53.6493532	0.05250	322.239	322.553575	0.09762
142	105.833	105.888657	0.05259	84.554	84.8547728	0.35572	160.216	160.567338	0.21929	52.1135	52.0426036	0.13604	328.253	328.35103	0.02986
143	106.795	106.819745	0.02317	81.0013	80.767929	0.28811	168.597	168.300622	0.17579	53.6542	53.6467244	0.01393	326.196	326.737751	0.16608
144	103.815	103.870019	0.05300	98.3002	98.4188827	0.12073	174.596	174.224499	0.21278	55.2786	55.2563107	0.04032	308.196	308.326642	0.04239
145	104.708	104.551443	0.14952	97.4786	97.2425526	0.24215	169.615	169.321588	0.17299	50.3882	50.3107669	0.15367	317.038	317.629245	0.18649
146	104.002	104.059721	0.05550	95.8717	95.7019971	0.17701	181.359	181.876362	0.28527	55.8298	55.7215893	0.19382	306.346	305.950507	0.12910
147	106.17	106.23072	0.05719	90.2118	91.4346069	1.35548	174.234	174.047264	0.10718	50.6675	50.5690062	0.19439	317.579	316.648976	0.29285
148	101.855	101.91879	0.06263	96.61	96.5560362	0.05586	175.64	175.68134	0.02354	53.6666	53.7532596	0.16148	317.581	317.453273	0.04022
149	111.66	112.062875	0.36081	78.5044	78.4160331	0.11256	176.022	175.386707	0.36092	57.3352	57.2383534	0.16891	304.777	304.328749	0.14708
150	105.089	105.274817	0.17682	91.798	91.411659	0.42086	170.828	170.715366	0.06593	53.0371	52.9835921	0.10089	319.321	319.301558	0.00609

151	108.423	108.398869	0.02226	92.3715	92.5517	0.19508	173.89	173.782838	0.06163	53.7772	53.9686609	0.35603	299.262	300.329291	0.35664
152	101.556	101.497073	0.05802	99.8887	99.6532761	0.23569	174.561	174.50672	0.03109	57.9085	57.879808	0.04955	308.102	307.962454	0.04529
153	100.45	100.203965	0.24493	95.1614	95.1740005	0.01324	171.815	171.970694	0.09062	59.1977	59.3296531	0.22290	314.068	313.901178	0.05312
154	101.672	101.861275	0.18616	104.714	105.054405	0.32508	175.882	175.939381	0.03262	56.0141	56.1528269	0.24766	301.463	301.066732	0.13145
155	111.087	110.876785	0.18923	70.4851	70.8214155	0.47714	166.543	166.778763	0.14156	52.6985	52.927037	0.43367	330.115	329.926802	0.05701
156	99.9642	99.7805251	0.18374	102.676	103.055451	0.36956	181.893	181.984639	0.05038	58.4203	58.4813476	0.10450	303.004	303.063543	0.01965
157	99.3573	99.4853722	0.12890	92.1152	91.8950073	0.23904	183.292	183.387091	0.05188	59.7931	59.6678595	0.20946	315.061	314.720696	0.10801
158	104.646	104.413482	0.22219	100.819	100.386149	0.42934	178.335	178.195878	0.07801	54.6094	54.4734878	0.24888	305.052	305.876537	0.27029
159	108.436	108.111235	0.29950	82.4899	83.3310439	1.01969	176.148	176.356819	0.11855	53.3938	53.3741126	0.03687	315.941	315.837314	0.03282
160	100.004	99.7901498	0.21384	95.9592	95.6509338	0.32125	179.967	179.847881	0.06619	58.0558	58.1670672	0.19166	309.827	310.619011	0.25563
161	109.41	109.238535	0.15672	74.6219	75.0746364	0.60671	175.386	175.34449	0.02367	53.7408	53.5956732	0.27005	322.519	323.210752	0.21448
162	99.7877	99.6549648	0.13302	98.7669	98.9090454	0.14392	183.806	183.581552	0.12211	58.3997	58.4903963	0.15530	306.509	306.966811	0.14936
163	104.126	104.071088	0.05274	95.3114	94.9568997	0.37194	175.276	175.303132	0.01548	54.2125	54.1982874	0.02622	314.126	314.139094	0.00417
164	111.137	111.523703	0.34795	67.9536	67.6823591	0.39916	174.089	174.291874	0.11653	57.3591	57.4911758	0.23026	323.065	322.173341	0.27600
165	106.281	106.069314	0.19918	81.9847	82.9907863	1.22716	170.891	170.68959	0.11786	55.7448	55.5719061	0.31015	321.094	321.562114	0.14579
166	104.419	104.352552	0.06364	82.948	83.5584623	0.73596	170.977	170.799142	0.10402	55.9081	55.8655724	0.07607	323.231	322.836328	0.12210
167	101.262	101.044522	0.21477	103.464	102.910114	0.53534	177.544	177.90173	0.20149	53.155	53.2552089	0.18852	308.183	308.479274	0.09614
168	104.05	103.985504	0.06199	90.8935	91.8801205	1.08547	173.947	173.830581	0.06693	51.5177	51.4875405	0.05854	321.842	321.502077	0.10562
169	99.7718	99.7945447	0.02280	93.0401	92.635223	0.43516	177.71	177.508682	0.11328	59.6849	59.5100249	0.29300	317.023	316.430432	0.18692
170	107.045	107.128986	0.07846	74.975	75.1088416	0.17851	169.729	169.713393	0.00920	57.3615	57.2909569	0.12298	325.57	325.27832	0.08959
171	104.405	104.343219	0.05917	83.3465	83.8782102	0.63795	175.258	175.158345	0.05686	59.9717	59.8987357	0.12166	314.079	314.266872	0.05982
172	100.814	100.686544	0.12643	101.189	101.395913	0.20448	190.821	190.912056	0.04772	60.2847	60.2441265	0.06730	297.33	297.675921	0.11634
173	103.382	103.79716	0.40158	92.7726	91.270431	1.61919	179.636	179.518197	0.06558	51.4861	51.7775126	0.56600	318.079	317.652163	0.13419
174	99.5325	99.6217375	0.08966	99.1354	98.7755141	0.36302	187.521	187.306947	0.11415	62.5397	62.4860708	0.08575	299.4	299.435759	0.01194
175	105.663	105.623087	0.03777	88.144	87.9138232	0.26114	156.812	157.525241	0.45484	50.6065	50.6716918	0.12882	327.295	327.776645	0.14716
176	106.297	106.394028	0.09128	85.0646	85.8822309	0.96119	182.186	180.743115	0.79198	61.4189	61.4230284	0.00672	304.16	303.150925	0.33176
177	110.612	110.429214	0.16525	78.5047	77.6957489	1.03045	179.032	178.688633	0.19179	56.9271	56.9488275	0.03817	307.305	308.734092	0.46504
178	105.598	105.440128	0.14950	90.2939	90.8986552	0.66976	179.688	179.728512	0.02255	58.107	58.3793846	0.46876	305.676	305.520484	0.05088
179	102.975	103.862989	0.86233	86.0952	87.3076348	1.40825	177.338	176.505395	0.46950	57.7626	57.2262049	0.92862	316.652	314.424788	0.70336
180	107.747	107.637287	0.10182	89.2989	89.1571202	0.15877	177.587	177.712097	0.07044	54.7522	54.7199905	0.05883	307.748	307.625292	0.03987

181	102.166	102.260509	0.09251	98.2498	97.9008037	0.35521	175.299	175.53791	0.13629	54.8906	54.8711697	0.03540	312.189	312.200064	0.00354
182	100.048	100.163865	0.11581	102.735	102.881943	0.14303	184.711	184.861353	0.08140	58.3423	58.4052133	0.10783	301.126	300.406949	0.23879
183	108.101	108.105515	0.00418	89.9528	89.9759579	0.02574	180.903	181.262309	0.19862	55.2362	55.2502346	0.02541	302.558	302.039425	0.17140
184	102.745	102.596668	0.14437	88.8774	88.8776826	0.00032	174.139	174.078349	0.03483	58.4502	58.4321903	0.03081	317.878	317.853263	0.00778
185	105.02	104.79796	0.21143	87.8364	88.9597566	1.27892	180.921	181.272952	0.19453	55.3514	55.4299848	0.14197	312.907	312.347984	0.17865
186	105.526	105.476052	0.04733	83.4823	83.5018338	0.02340	177.293	177.291948	0.00059	60.8315	60.8037121	0.04568	312.58	312.781259	0.06439
187	102.829	102.439443	0.37884	89.654	88.3776207	1.42367	177.015	177.458411	0.25049	59.7102	59.9830782	0.45700	310.639	312.935744	0.73936
188	108.372	108.527544	0.14353	77.9422	78.2841427	0.43871	175.465	175.335625	0.07373	52.6907	52.4621087	0.43384	322.301	322.802179	0.15550
189	104.842	103.438428	1.33875	94.5746	94.8894642	0.33293	160.864	162.843174	1.23034	52.1091	53.2598781	2.20840	312.588	314.661103	0.66321
190	101.85	101.957422	0.10547	100.878	100.902638	0.02442	184.311	184.238592	0.03929	59.0509	59.118783	0.11496	298.964	298.621634	0.11452
191	102.568	102.744223	0.17181	103.879	104.444893	0.54476	170.845	170.542731	0.17693	55.933	55.7393162	0.34628	301.594	301.574139	0.00659
192	100.606	100.487489	0.11780	104.254	104.430812	0.16960	183.317	183.340424	0.01278	58.8443	58.871813	0.04676	300.202	300.21526	0.00442
193	109.383	109.434556	0.04713	72.0807	71.5426252	0.74649	173.434	173.385817	0.02778	53.8775	53.7014432	0.32677	326.546	327.544073	0.30565
194	107.548	107.68348	0.12597	92.7172	92.3427951	0.40381	168.157	168.158638	0.00097	51.8636	52.1471528	0.54673	315.288	314.352472	0.29672
195	98.9241	98.7719425	0.15381	101.835	102.352697	0.50837	185.908	185.688092	0.11829	58.1146	58.2169049	0.17604	302.529	302.830513	0.09966
196	100.066	99.9474722	0.11845	96.9081	96.8968767	0.01158	169.101	169.181278	0.04747	55.5552	55.5807904	0.04606	316.158	315.988883	0.05349
197	108.271	108.050806	0.20337	103.634	105.053163	1.36940	175.415	175.291775	0.07025	50.3112	50.3432963	0.06380	287.034	287.720693	0.23924
198	100.668	100.520163	0.14686	99.4233	99.2403189	0.18404	178.65	178.471381	0.09998	60.0371	60.0277417	0.01559	305.396	305.558942	0.05335
199	103.497	103.449015	0.04636	91.5981	91.2776729	0.34982	170.189	169.821966	0.21566	54.2098	54.1662242	0.08038	322.616	323.104699	0.15148
200	101.781	101.612718	0.16534	90.1983	90.1382649	0.06656	176.12	176.148963	0.01645	60.0911	59.9535091	0.22897	313.966	314.172172	0.06567
201	102.447	102.301112	0.14240	100.229	100.269392	0.04030	179.026	179.041644	0.00874	54.0428	54.1533775	0.20461	311.928	311.617137	0.09966
202	104.829	104.86209	0.03157	104.693	105.13616	0.42329	177.516	177.912322	0.22326	54.0129	54.0815734	0.12714	298.437	297.695079	0.24860
203	101.713	101.564528	0.14597	105.744	105.595799	0.14015	180.422	180.502862	0.04482	56.6085	56.6066406	0.00328	302.09	302.407288	0.10503
204	104.597	104.877436	0.26811	87.6469	87.647944	0.00119	171.317	171.416341	0.05799	52.3827	52.4528537	0.13393	323.602	323.398771	0.06280
205	103.287	103.286844	0.00015	94.4879	94.7809487	0.31014	172.086	171.979263	0.06203	51.2965	51.2635269	0.06428	320.608	320.337842	0.08426
206	102.203	102.337366	0.13147	108.006	107.483631	0.48365	176.833	177.165683	0.18813	54.0156	53.935994	0.14738	297.725	297.362544	0.12174
207	99.8284	99.6483241	0.18039	98.3934	98.1059963	0.29210	179.607	179.4449	0.09025	60.1471	60.0887185	0.09706	307.202	307.548913	0.11293
208	104.212	104.366779	0.14852	88.0966	87.8219432	0.31177	167.47	167.537354	0.04022	53.0706	53.1439428	0.13820	325.609	325.921267	0.09590
209	103.315	102.977866	0.32632	100.28	100.322415	0.04230	181.551	181.586699	0.01966	57.1678	57.0678541	0.17483	304.101	304.719631	0.20343
210	103.614	103.666292	0.05047	87.3441	87.6983194	0.40554	175.358	175.280171	0.04438	61.8479	61.7820914	0.10640	310.464	310.400462	0.02047

211	112.454	112.781415	0.29115	76.0091	76.525525	0.67943	164.986	164.404323	0.35256	54.898	54.8913755	0.01207	318.759	318.806793	0.01499
212	101.757	101.957576	0.19711	98.6524	98.6070068	0.04601	185.793	185.356645	0.23486	62.6274	62.5281374	0.15850	296.539	296.893883	0.11968
213	101.588	101.576113	0.01170	99.1948	99.2187249	0.02412	193.419	193.365738	0.02754	60.9377	61.0855986	0.24270	296.875	297.049832	0.05889
214	103.637	103.686834	0.04808	91.6977	91.4219985	0.30066	177.811	178.030876	0.12366	56.6737	56.7137045	0.07059	311.618	311.615336	0.00085
215	100.792	101.033827	0.23993	96.2082	95.2262592	1.02064	173.207	172.828697	0.21841	54.3605	54.5034937	0.26305	319.171	320.065837	0.28036
216	104.374	104.376498	0.00239	93.5768	93.698127	0.12965	177.82	178.211037	0.21991	56.4691	56.4803166	0.01986	311.725	311.512249	0.06825
217	104.373	104.27764	0.09137	97.7954	97.6903161	0.10745	172.531	172.242682	0.16711	54.3894	54.0955591	0.54025	313.53	313.969	0.14002
218	101.348	101.449756	0.10040	101.959	101.764993	0.19028	187.389	187.106087	0.15098	59.6304	59.7704585	0.23488	297.929	298.135483	0.06931
219	107.738	107.326946	0.38153	92.5691	91.8285695	0.79998	171.477	171.32678	0.08760	52.5328	52.5063079	0.05043	311.134	311.53721	0.12959
220	104.63	104.637108	0.00679	88.9457	88.8209961	0.14020	177.28	177.262852	0.00967	58.1494	58.2091654	0.10278	310.165	310.324146	0.05131
221	108.197	108.307231	0.10188	75.4654	75.1155248	0.46362	158.729	159.352741	0.39296	53.6519	53.7477655	0.17868	332.158	332.050903	0.03224
222	105.483	105.54301	0.05689	83.8327	84.5824469	0.89434	186.853	186.932314	0.04245	62.0412	62.0674588	0.04232	304.761	304.456872	0.09979
223	97.6675	97.7107522	0.04429	103.776	103.25397	0.50303	181.341	181.081697	0.14299	57.9025	57.8698265	0.05643	308.77	308.2512	0.16802
224	108.234	108.287287	0.04923	82.9357	82.8858144	0.06015	166.824	166.685413	0.08307	54.6618	54.7608747	0.18125	321.659	321.602332	0.01762
225	101.143	101.027405	0.11429	94.6179	94.3277844	0.30662	179.16	179.102013	0.03237	58.4979	58.3068185	0.32665	315.896	315.627522	0.08499
226	107.893	107.137706	0.70004	101.021	102.418765	1.38364	172.944	173.167257	0.12909	50.7363	50.777475	0.08115	293.271	294.739597	0.50076
227	103.729	103.633975	0.09161	96.7953	96.5218082	0.28255	185.28	185.587165	0.16578	58.5534	58.5982204	0.07655	301.958	302.549311	0.19583
228	100.979	101.219079	0.23775	98.9071	98.9423852	0.03568	174.287	173.952807	0.19175	51.8508	52.0938158	0.46868	321.299	321.106931	0.05978
229	104.389	104.181246	0.19902	98.5102	99.1625139	0.66218	165.962	165.726465	0.14192	53.4706	53.3954336	0.14058	315.584	315.588636	0.00147
230	105.985	105.883547	0.09572	91.4369	91.4703792	0.03661	178.322	178.514626	0.10802	56.9845	57.0825681	0.17210	303.091	303.3213	0.07598
231	100.228	100.157531	0.07031	100.803	100.645458	0.15629	176.032	175.836682	0.11096	54.0502	54.0475671	0.00487	314.739	314.921744	0.05806
232	109.859	110.083397	0.20426	74.3052	73.6417486	0.89287	174.428	174.469618	0.02386	53.4357	53.4073525	0.05305	323.363	323.398735	0.01105
233	102.317	102.252958	0.06259	99.0564	99.6481324	0.59737	172.867	172.640437	0.13106	56.3697	56.4154807	0.08122	302.317	302.390136	0.02419
234	101.348	101.591737	0.24050	94.8646	94.7877124	0.08105	175.015	175.348068	0.19031	56.1088	56.0158383	0.16568	309.524	309.160214	0.11753
235	107.612	107.603925	0.00750	93.6369	93.7572844	0.12857	172.363	172.537434	0.10120	52.4722	52.5517245	0.15156	305.292	304.56625	0.23772
236	101.921	102.008513	0.08586	98.0049	98.2021847	0.20130	177.223	177.832712	0.34404	53.0848	53.2947925	0.39558	315.673	315.324824	0.11030
237	107.341	107.024371	0.29498	95.4253	95.284383	0.14767	174.436	174.432766	0.00185	51.3221	51.3068292	0.02975	307.561	307.665005	0.03382
238	104.31	104.330624	0.01977	92.6782	92.4552268	0.24059	184.057	184.306278	0.13544	57.8697	57.9285554	0.10170	300.065	300.308942	0.08130
239	105.95	105.819287	0.12337	84.4564	84.3670841	0.10575	161.993	162.791139	0.49270	55.3311	55.5051137	0.31450	325.075	325.186634	0.03434
240	101.779	101.903332	0.12216	93.683	93.2197593	0.49448	186.802	186.98209	0.09641	56.1137	56.1964912	0.14754	308.912	308.796754	0.03731

241	102.869	102.953011	0.08167	98.435	98.0969166	0.34346	170.867	170.817237	0.02912	52.2882	52.2150301	0.13994	315.075	314.955876	0.03781
242	101.892	102.14454	0.24785	98.6796	98.5468599	0.13452	174.417	174.294296	0.07035	52.6682	52.6883835	0.03832	317.555	317.452485	0.03228
243	101.457	101.511901	0.05411	93.4022	93.4422732	0.04290	181.17	181.651205	0.26561	59.0868	59.0673126	0.03298	313.648	312.894793	0.24014
244	100.9	100.993392	0.09256	106.544	106.879459	0.31486	186.574	186.292448	0.15091	57.2148	57.1379921	0.13424	294.476	294.721676	0.08343
245	102.929	102.809262	0.11633	101.855	102.220482	0.35883	174.346	174.410063	0.03674	53.2551	53.0623997	0.36184	311.582	311.539897	0.01351
246	103.242	103.226649	0.01487	101.192	101.580313	0.38374	173.505	173.425566	0.04578	55.221	55.1770265	0.07963	305.952	306.075356	0.04032
247	100.288	100.048662	0.23865	104.927	103.776416	1.09656	175.296	175.577719	0.16071	52.6534	52.7250205	0.13602	306.087	306.91056	0.26906
248	100.751	101.044804	0.29161	97.0871	97.3760796	0.29765	183.197	183.59617	0.21789	56.6753	56.6908496	0.02744	311.036	310.108234	0.29828
249	101.605	101.638888	0.03335	93.3979	93.1836185	0.22943	179.871	179.21324	0.36568	62.1465	62.1058899	0.06535	304.779	305.041911	0.08626
250	102.446	102.436106	0.00966	91.0597	90.6358248	0.46549	176.002	176.24054	0.13553	56.7198	56.7387647	0.03344	317.325	317.699478	0.11801
251	99.9673	99.8991827	0.06814	95.139	94.8047678	0.35131	185.134	185.153184	0.01036	59.8137	59.9779849	0.27466	305.242	305.739065	0.16284
252	99.2238	99.1709073	0.05331	99.8662	99.8180506	0.04821	184.921	184.822109	0.05348	59.0721	59.0717027	0.00067	306.675	307.070468	0.12895
253	103.185	103.16309	0.02123	96.2439	96.1226192	0.12601	168.019	168.231075	0.12622	51.9506	52.0250576	0.14332	321.308	321.245821	0.01935
254	120.803	120.781169	0.01807	71.2629	70.848509	0.58150	161.878	161.872368	0.00348	50.4608	50.3014784	0.31573	306.999	306.731041	0.08728
255	103.725	103.466018	0.24968	87.8931	88.3142783	0.47919	175.384	175.650619	0.15202	56.4238	56.4201501	0.00647	319.768	319.870735	0.03213
256	103.539	103.664655	0.12136	96.6954	96.6838527	0.01194	190.521	190.417468	0.05434	56.5715	56.6790662	0.19014	300.537	300.917022	0.12645
257	106.348	106.564416	0.20350	80.4067	80.6710463	0.32876	175.546	175.466142	0.04549	55.0345	55.2844546	0.45418	320.306	319.639892	0.20796
258	105.072	104.616154	0.43384	101.156	101.188949	0.03257	171.073	170.907861	0.09653	51.3723	51.2247261	0.28726	310.168	310.789753	0.20046
259	100.003	100.188629	0.18562	104.104	104.142977	0.03744	184.853	184.939349	0.04671	60.7626	60.5585204	0.33586	298.51	298.278448	0.07757
260	108.926	108.889143	0.03384	87.7118	87.5989985	0.12860	168.733	168.668377	0.03830	52.4154	52.6385352	0.42571	315.583	314.783343	0.25339
261	109.647	109.511704	0.12339	70.2261	70.4276077	0.28694	176.614	176.934997	0.18175	57.3976	57.4313935	0.05888	322.309	321.94788	0.11204
262	113.025	113.283952	0.22911	71.4247	71.0670849	0.50069	166.513	166.238261	0.16500	51.0802	51.090539	0.02024	325.418	325.216571	0.06190
263	105.777	105.704057	0.06896	94.4455	93.5610599	0.93646	173.508	172.892229	0.35489	55.0365	54.8967743	0.25388	310.286	311.455726	0.37698
264	99.5641	99.3401208	0.22496	100.651	101.005811	0.35252	184.552	184.515328	0.01987	60.3606	60.4026122	0.06960	302.055	302.747552	0.22928
265	106.021	106.182645	0.15247	83.5466	83.6191669	0.08686	174.887	175.046223	0.09104	54.6023	54.554512	0.08752	321.16	321.127119	0.01024
266	106.596	106.404818	0.17935	74.8223	74.4512606	0.49589	177.316	177.19735	0.06691	58.0421	57.9769919	0.11217	322.056	322.164925	0.03382
267	118.688	118.58673	0.08532	60.5624	60.0556363	0.83676	158.342	158.85774	0.32571	50.1743	50.3508983	0.35197	329.867	330.256374	0.11804
268	112.449	112.687145	0.21178	70.3726	70.4208134	0.06851	171.029	170.738356	0.16994	53.031	52.9081416	0.23167	323.177	322.466684	0.21979
269	105.753	105.430135	0.30530	86.9806	87.2196523	0.27483	166.445	166.465508	0.01232	52.7588	52.8099944	0.09703	319.58	320.182802	0.18862
270	107.227	107.179455	0.04434	85.2788	85.3342789	0.06506	179.048	179.129969	0.04578	56.8238	56.7176478	0.18681	311.348	311.527619	0.05769

271	103.906	103.812244	0.09023	98.482	97.908959	0.58187	179.066	178.797647	0.14986	56.0169	56.0047184	0.02175	307.183	307.752262	0.18532
272	102.624	102.660726	0.03579	93.0912	92.5761201	0.55331	177.539	177.773798	0.13225	52.0836	52.1588556	0.14449	320.946	320.780274	0.05164
273	105.79	105.681946	0.10214	86.9779	86.9095376	0.07860	177.184	177.304637	0.06809	57.6298	57.6641604	0.05962	312.966	313.545104	0.18504
274	104.225	104.30831	0.07993	96.9035	96.5781943	0.33570	163.98	164.023768	0.02669	48.9232	48.9087027	0.02963	322.8	322.836407	0.01128
275	100.635	100.489415	0.14467	95.6	95.5173402	0.08646	184.922	185.153214	0.12503	58.2618	58.3387734	0.13212	307.921	308.418831	0.16167
276	106.121	105.753584	0.34622	92.6908	92.8689323	0.19218	173.128	173.321545	0.11179	52.0184	52.114094	0.18396	312.939	313.492618	0.17691
277	110.231	110.254012	0.02088	70.3449	70.3927043	0.06796	176.016	176.403864	0.22036	57.6178	57.7522511	0.23335	319.843	319.236782	0.18954
278	103.411	104.417914	0.97370	93.1943	92.8273099	0.39379	172.248	171.839818	0.23697	52.8661	52.4918464	0.70793	317.798	315.526424	0.71479
279	101.935	101.883875	0.05015	91.9381	91.5902863	0.37831	178.986	178.916237	0.03898	57.1405	57.1560847	0.02727	312.864	313.530162	0.21292
280	105.03	104.833122	0.18745	87.5899	87.9212828	0.37833	173.962	174.466879	0.29022	52.1793	52.2393593	0.11510	322.434	322.481978	0.01488
281	102.407	102.474905	0.06631	102.152	102.264298	0.10993	180.121	180.036043	0.04717	54.5806	54.4507424	0.23792	307.013	307.499724	0.15854
282	100.371	100.43894	0.06769	96.9378	97.0122975	0.07685	177.352	177.175297	0.09963	57.2682	57.2217205	0.08116	310.814	310.558714	0.08213
283	106.85	106.710055	0.13097	90.1619	90.2453955	0.09261	167.129	167.143742	0.00882	54.3984	54.5255422	0.23372	314.009	314.220885	0.06748
284	111.378	111.369273	0.00784	77.9533	77.4173655	0.68751	170.877	170.732361	0.08465	52.6867	52.5527401	0.25426	318.036	318.080117	0.01387
285	111.922	111.64312	0.24917	69.6153	69.3444409	0.38908	175.923	176.088965	0.09434	55.1913	55.3358846	0.26197	320.348	321.482669	0.35420
286	103.835	103.550765	0.27374	89.3329	90.0030057	0.75012	174.369	174.542274	0.09937	54.6312	54.6169592	0.02607	318.659	318.955495	0.09304
287	104	103.896846	0.09919	91.0018	90.7989081	0.22295	186.639	186.493135	0.07815	57.2423	57.3791424	0.23906	305.298	305.237037	0.01997
288	101.583	101.604489	0.02115	95.6556	95.190097	0.48664	178.008	177.951585	0.03169	59.2471	59.2493286	0.00376	313.23	312.383536	0.27024
289	102.89	102.878162	0.01151	97.8627	97.4273306	0.44488	170.644	170.853121	0.12255	52.6036	52.5630044	0.07717	315.333	315.722337	0.12347
290	101.728	101.739527	0.01133	104.395	104.600611	0.19696	180.165	180.122206	0.02375	52.0903	52.1374144	0.09045	308.255	308.509465	0.08255
291	100.912	100.888245	0.02354	100.06	100.595933	0.53561	173.453	173.390658	0.03594	53.9188	53.8923239	0.04910	312.797	312.604292	0.06161
292	99.6176	99.6705028	0.05311	101.187	101.904118	0.70871	179.744	180.148182	0.22487	56.9466	56.9960647	0.08686	304.313	304.386952	0.02430
293	101.576	101.622459	0.04574	92.6378	92.1111038	0.56855	182.002	182.568585	0.31131	60.5686	60.5866845	0.02986	311.087	310.803589	0.09110
294	103.312	103.362964	0.04933	89.1757	88.8743124	0.33797	187.02	186.729216	0.15548	56.2781	56.4888773	0.37453	313.622	313.509824	0.03577
295	103.058	102.249505	0.78450	97.363	97.0072902	0.36534	164.792	164.933558	0.08590	51.4926	51.6463383	0.29856	315.99	317.962583	0.62425
296	105.458	105.434218	0.02255	87.9736	88.4594362	0.55225	175.399	175.316424	0.04708	55.4241	55.4514133	0.04928	310.755	310.623198	0.04241
297	100.889	100.864231	0.02455	94.9605	94.1928365	0.80840	183.123	183.419414	0.16187	59.4192	59.436272	0.02873	308.806	309.402099	0.19303
298	105.509	105.447555	0.05824	87.0756	86.8250841	0.28770	169.69	169.678447	0.00681	56.4966	56.5310929	0.06105	320.16	320.040339	0.03738
299	108.862	108.742953	0.10936	82.1073	82.4544692	0.42282	180.297	180.64851	0.19496	55.2505	55.1431653	0.19427	310.254	310.062858	0.06161
300	101.098	100.714245	0.37959	106.259	107.146996	0.83569	182.756	183.154193	0.21788	56.8615	56.5473705	0.55245	303.201	304.044699	0.27826

301	109.198	109.051294	0.13435	77.6481	78.2029927	0.71463	174.174	174.681345	0.29129	52.3703	52.3916577	0.04078	322.045	321.696349	0.10826
302	100.585	100.839282	0.25280	102.416	102.706549	0.28369	170.478	170.644595	0.09772	55.753	55.6982986	0.09811	306.945	306.710963	0.07625
303	107.453	107.466099	0.01219	91.3046	91.1403519	0.17989	184.78	184.30713	0.25591	56.1647	56.0839901	0.14370	299.094	299.615572	0.17438
304	111.167	110.691156	0.42804	72.7376	73.6701796	1.28211	171.794	172.468972	0.39290	51.2085	51.2054484	0.00596	325.099	324.36801	0.22485
305	102.492	102.524194	0.03141	94.7816	94.52971	0.26576	181.751	182.045664	0.16213	59.6751	59.6396501	0.05940	307.946	308.084228	0.04489
306	102.536	102.493464	0.04148	93.8776	93.4023586	0.50624	175.626	175.672684	0.02658	57.1247	57.1597823	0.06141	309.721	310.246459	0.16966
307	106.585	106.465836	0.11180	96.0144	97.3242564	1.36423	174.19	174.513349	0.18563	54.2996	54.3518728	0.09627	296.042	296.036066	0.00200
308	104.626	104.776024	0.14339	80.2177	80.0471016	0.21267	173.003	172.579384	0.24486	56.9664	56.9047841	0.10816	323.568	323.393647	0.05388
309	101.055	101.145569	0.08962	92.3349	91.6583558	0.73271	177.531	177.845023	0.17688	60.0308	60.0537152	0.03817	314.783	314.233819	0.17446
310	102.484	102.633869	0.14624	92.409	92.6078206	0.21515	177.785	177.932472	0.08295	55.4243	55.3231013	0.18259	318.538	318.428156	0.03448
311	102.94	102.91985	0.01957	105.517	105.300872	0.20483	189.881	189.458697	0.22240	57.305	57.226148	0.13760	290.31	290.4303	0.04144
312	103.781	103.902532	0.11710	94.6029	94.1204931	0.50993	175.37	175.536666	0.09504	56.0081	56.0743225	0.11824	313.144	312.933754	0.06714
313	112.281	112.257695	0.02076	71.328	72.6430635	1.84368	175.438	175.565285	0.07255	53.57	53.3680854	0.37692	319.027	318.402206	0.19584
314	102.233	101.961773	0.26530	100.51	100.618536	0.10798	182.276	182.118319	0.08651	58.3622	58.3116348	0.08664	303.024	303.922867	0.29663
315	104.763	104.802249	0.03746	85.6126	85.6405974	0.03270	179.153	179.311293	0.08836	56.7521	56.7460288	0.01070	315.674	315.819021	0.04594
316	107.479	107.2846	0.18087	78.9533	79.6135634	0.83627	174.427	174.093829	0.19101	56.1362	56.2891284	0.27242	316.452	316.671505	0.06936
317	103.161	103.174826	0.01340	95.2369	95.2874077	0.05303	172.858	172.991412	0.07718	54.0678	54.1201611	0.09684	315.107	314.800675	0.09721
318	101.492	101.441823	0.04944	95.5878	95.6755567	0.09181	168.718	168.574219	0.08522	54.0507	54.0638069	0.02425	318.335	318.581705	0.07750
319	104.557	104.512888	0.04219	96.2281	96.2910586	0.06543	172.848	173.359328	0.29583	53.8712	54.2023309	0.61467	315.587	314.287389	0.41181
320	102.546	102.739833	0.18902	98.2252	97.9272121	0.30337	186.973	187.136458	0.08742	57.9996	58.2038258	0.35212	301.216	300.796881	0.13914
321	100.346	100.460658	0.11426	96.1479	95.4008983	0.77693	176.272	176.218585	0.03030	56.5332	56.447185	0.15215	316.784	317.214431	0.13588
322	113.164	113.249461	0.07552	65.4892	65.851481	0.55319	164.503	164.667992	0.10030	52.621	52.738253	0.22283	331.169	330.442571	0.21935
323	105.646	105.780751	0.12755	78.8776	80.0430328	1.47752	189.82	188.786143	0.54465	58.7303	58.7532947	0.03915	313.943	313.943968	0.00031
324	101.829	101.777911	0.05017	98.2485	98.1363405	0.11416	185.682	185.891445	0.11280	58.0703	58.1503113	0.13778	305.838	305.692699	0.04751
325	103.403	103.397366	0.00545	94.3062	93.7059794	0.63646	178.146	178.254528	0.06092	57.5749	57.6331689	0.10121	310.772	311.009874	0.07654
	Error porcentual promedio		0.14820	Error porcentual promedio		0.43921	Error porcentual promedio		0.14028	Error porcentual promedio		0.16288	Error porcentual promedio		0.12655

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.

ANEXO E: ERRORES PORCENTUALES REGISTRADOS EN LA VALIDACIÓN EXTERNA DE LA RNA

Salidas de la Red Neuronal Artificial															
Predicción N°	LN (DWSIM)	LN (Predicho)	% Error	HN (DWSIM)	HN (Predicho)	% Error	LD (DWSIM)	LD (Predicho)	% Error	HD (DWSIM)	HD (Predicho)	% Error	RESIDUE (DWSIM)	RESIDUE (Predicho)	% Error
1	103.322	104.050118	0.70471	95.9833	98.9788203	3.12088	177.455	176.797331	0.37061	51.8952	51.2764814	1.19225	315.408	311.123068	1.35854
2	105.033	104.359902	0.64084	101.652	102.227786	0.56643	179.269	179.133045	0.07584	55.7006	55.5279049	0.31004	295.691	295.185924	0.17081
3	105.931	106.070778	0.13195	78.4782	78.5751781	0.12357	180.071	179.80041	0.15027	54.7499	54.3050963	0.81243	322.657	324.478171	0.56443
4	104.295	103.287628	0.96589	84.0654	85.3035071	1.47279	172.556	172.260165	0.17144	57.2076	57.3781114	0.29806	320.681	321.515864	0.26034
5	113.723	115.288247	1.37637	70.6092	68.8941584	2.42892	174.469	173.35727	0.63721	56.1002	56.2950973	0.34741	313.274	311.573247	0.54290
6	105.786	104.510274	1.20595	79.5776	81.5385302	2.46417	172.707	172.037785	0.38749	55.4188	55.2674808	0.27305	325.64	328.098085	0.75485
7	108.66	108.277158	0.35233	92.2426	92.7182219	0.51562	185.458	185.709294	0.13550	55.9719	55.9674164	0.00801	294.081	293.079401	0.34059
8	104.606	104.043405	0.53782	91.6478	92.7137995	1.16315	181.328	182.436301	0.61121	56.8532	56.9749702	0.21418	308.956	308.540658	0.13443
9	110.888	104.724783	5.55806	74.644	92.6477533	24.11949	166.518	171.63162	3.07091	51.7647	53.6777704	3.69570	327.101	318.285379	2.69508
10	103.714	103.670814	0.04164	100.353	101.742566	1.38468	178.347	178.156111	0.10703	55.2951	55.0423432	0.45711	303.235	301.136224	0.69213
11	110.298	110.782521	0.43928	70.5246	68.3545437	3.07702	179.381	179.580271	0.11109	57.0127	57.1344917	0.21362	319.888	321.07205	0.37015
12	108.018	107.750437	0.24770	85.5312	87.0683281	1.79715	165.301	164.23319	0.64598	52.9946	52.3263757	1.26093	317.204	317.541028	0.10625
13	103.817	103.44023	0.36292	94.4791	95.9048931	1.50911	169.201	167.994867	0.71284	53.9697	53.5237196	0.82635	320.055	320.030968	0.00751
14	105.535	105.288186	0.23387	86.4062	86.4123209	0.00708	181.371	181.788735	0.23032	59.9648	60.5388233	0.95727	309.356	309.248246	0.03483
15	107.068	106.97876	0.08335	78.1639	77.8574666	0.39204	176.372	176.102294	0.15292	56.8479	56.9387329	0.15978	322.058	322.92913	0.27049
16	106.297	106.631636	0.31481	82.0326	84.1805882	2.61846	171.128	170.842221	0.16700	54.8499	54.9662303	0.21209	320.365	316.580317	1.18137
17	107.328	106.688488	0.59585	89.6304	90.6523898	1.14023	169.102	167.601954	0.88707	52.8427	52.4644282	0.71584	315.154	315.695555	0.17184
18	103.341	102.959336	0.36932	94.8597	96.5803581	1.81390	171.719	170.788604	0.54181	52.8737	52.5244256	0.66058	320.49	320.192269	0.09290
19	101.342	101.442982	0.09964	100.721	101.917595	1.18803	181.005	180.935072	0.03863	56.0181	55.6631378	0.63366	301.165	298.433567	0.90696
20	102.582	102.517592	0.06279	104.649	105.972272	1.26449	181.095	176.131168	2.74101	54.3297	53.8548737	0.87397	299.522	297.67964	0.61510
21	107.037	107.040533	0.00330	80.3064	80.5630366	0.31957	174.12	173.020509	0.63146	56.7407	56.3473977	0.69316	320.435	320.937264	0.15674
22	102.036	101.37392	0.64887	96.7752	97.1979328	0.43682	175.351	174.829743	0.29726	54.3547	53.9473568	0.74942	311.074	311.192764	0.03818
23	101.829	101.285955	0.53329	100.604	101.49426	0.88491	179.986	179.719629	0.14800	60.1736	60.3365246	0.27076	300.862	300.108324	0.25051
24	107.371	107.005239	0.34065	78.2265	78.7328382	0.64727	168.209	167.725919	0.28719	56.6848	56.86385	0.31587	322.229	322.628557	0.12400
25	105.107	104.490414	0.58663	92.5792	93.8341562	1.35555	167.952	166.41683	0.91405	53.4495	52.9430936	0.94745	319.365	320.337805	0.30461
	Error porcentual promedio		0.65751	Error porcentual promedio		2.23245	Error porcentual promedio		0.56897	Error porcentual promedio		0.68396	Error porcentual promedio		0.48582

Realizado por: OSORIO, Julián 2024.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 23/ 05 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR

Nombres – Apellidos: Julián Andrés Osorio Getial

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: Ciencias

Carrera: Ingeniería Química

Título a optar: Ingeniero Químico

Ing. Cristina Gabriela Calderón Tapia, MsC
Director del Trabajo de Titulación

Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy, Mgs
Asesor del Trabajo de Titulación