



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE
FRACCIONAMIENTO PARA LA SEPARACIÓN DE LOS
COMPONENTES DEL CRUDO EN PROCESOS DE
REFINACIÓN**

Trabajo de Titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: EDISON ALEXANDER ORTIZ VILLEGAS

DIRECTOR: Ing. JUAN PABLO CHUQUÍN VASCO MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Edison Alexander Ortiz Villegas

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 del Autor.

Yo, EDISON ALEXANDER ORTIZ VILLEGAS, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este 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 titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de enero de 2022

Edison Alexander Ortiz Villegas

180464011-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Propuesta Tecnológica, **SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE FRACCIONAMIENTO PARA LA SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CRUDO EN PROCESOS DE REFINACIÓN**, realizado por el señor: **EDISON ALEXANDER ORTIZ VILLEGAS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: CARLOS RAMIRO CEPEDA GODOY _____	2022-01-17
Ing. Juan Pablo Chuquín Vasco MsC. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: JUAN PABLO CHUQUIN _____	2022-01-17
Ing. Daniel Antonio Chuquín Vasco MsC. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: DANIEL ANTONIO CHUQUIN VASCO _____	2022-01-17

DEDICATORIA

Con mucha dicha, dedico este trabajo a mis abuelitos, Luis y Cristina, por toda la dedicación, esfuerzo, paciencia y perseverancia que han impuesto en mí, porque toda meta alcanzada y todo lo que soy es gracias a su inquebrantable apoyo y guía. Sin duda alguna, ellos son y serán mi ejemplo y motivación.

Edison.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por la vida y la salud que me ha brindado, por todas las oportunidades que me ha regalado y me han llevado a convertirme en un profesional.

Gracias a mis padres por su entrega incondicional, confianza, tiempo y soporte no solo económico, sino también moral y emocional. Ellos me enseñaron que la mejor herencia que un padre puede dejarle a sus hijos es la educación.

Agradezco a mis buenos amigos que todos estos años se han convertido en un pilar fundamental para mí, porque siempre con su forma de ser y locuras me han levantado el ánimo a seguir adelante y a nunca rendirme.

De igual manera, agradezco al Ing. Daniel Chuquín por la confianza y oportunidad que me brindó para desarrollar el presente proyecto de titulación, por su guía, motivación y enseñanzas. Una inmensa gratitud a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Facultad de Ciencias, por abrirme sus puertas y formarme profesionalmente, pero, además, porque allí conocí, aprendí y compartí con mis docentes, amigos y compañeros como una familia.

Edison.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
SIGLAS / ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación del proyecto.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5. Alcance.....	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Estado del Arte.....	5
2.1.1. <i>El petróleo</i>	5
2.1.1.1. <i>Características físico-químicas del petróleo</i>	5
2.1.1.2. <i>Composición del petróleo</i>	5
2.1.1.3. <i>Refinación del petróleo</i>	7
2.1.2. <i>Simulación de procesos químicos</i>	7
2.1.2.1. <i>Simulador DWSIM</i>	8
2.1.2.2. <i>Simulador Aspen HYSYS</i>	8
2.1.2.3. <i>Simulador ChemCAD</i>	9
2.1.3. Redes Neuronales Artificiales (RNA)	9
2.1.3.1. <i>RNA en procesos químicos</i>	10
2.1.3.2. <i>RNA en procesos de destilación</i>	11

2.2.	Bases Teóricas	12
2.2.1.	Procesos de destilación de crudo	12
2.2.1.1.	<i>Destilación atmosférica</i>	12
2.2.1.2.	<i>Destilación al vacío</i>	13
2.2.1.3.	<i>Productos de las columnas de destilación atmosférica y al vacío</i>	14
2.2.2.	Red Neuronal Artificial (RNA)	14
2.2.2.1.	<i>Fundamento biológico de la RNA</i>	15
2.2.2.2.	<i>Modelo de una neurona artificial</i>	16
2.2.2.3.	<i>Entradas y salidas neuronales</i>	17
2.2.2.4.	<i>Pesos sinápticos</i>	17
2.2.2.5.	<i>Regla de propagación</i>	17
2.2.2.6.	<i>Función de activación</i>	18
2.2.2.7.	<i>Función de salida</i>	19
2.2.3.	Arquitectura de una Red Neuronal Artificial	19
2.2.4.	Tipos de RNAs	20
2.2.4.1.	<i>Perceptrón</i>	20
2.2.4.2.	<i>Perceptrón Multicapa</i>	21
2.2.4.3.	<i>Red Backpropagation</i>	22
2.2.5.	Entrenamiento de RNAs	24
2.2.5.1.	<i>Método de gradiente descendiente</i>	24
2.2.5.2.	<i>Algoritmo Backpropagation</i>	25
2.2.6.	Simulador libre DWSIM	26
2.2.6.1.	<i>Características</i>	26
2.3.	Marco Legal	30
2.3.1.	Software Libre en Ecuador	30
2.3.1.1.	<i>Código Orgánico de Economía Social</i>	31
2.3.1.2.	<i>Decreto No. 1014</i>	31
2.3.1.3.	<i>Plan Nacional de Gobierno Electrónico (PNGE)</i>	32
2.3.2.	Software Libre de DWSIM	33

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA	34
3.1.	Etapas de la metodología	34
3.2.	Determinación de parámetros importantes	35
3.2.1.	<i>Descripción del proceso</i>	35
3.2.2.	<i>Método de prueba ASTM D86</i>	39

3.2.3.	<i>Destilación TBP en el proceso</i>	39
3.2.4.	<i>Propiedades termodinámicas</i>	40
3.3.	Simulación mediante DWSIM	41
3.4.	Validación de la simulación	50
3.5.	Tratamiento de datos	51
3.6.	Creación de la red neuronal artificial	56
3.7.	Entrenamiento y aprendizaje de la RNA	58
3.8.	Análisis estadístico	61

CAPÍTULO IV

4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	62
4.1.	Presupuesto	62
4.2.	Recursos y Materiales	62
4.3.	Cronograma	63
4.4.	Discusión y análisis de resultados	64
4.4.1.	<i>Resultados de la simulación en el software DWSIM</i>	64
4.4.2.	<i>Resultados de la validación de la simulación</i>	66
4.5.	Resultados obtenidos por la RNA	67
4.5.1.	<i>Comparación de los datos simulados con datos experimentales</i>	69
4.6.	Resultados del análisis estadístico	71
4.6.1.	<i>Prueba de Kruskal-Wallis</i>	71
4.6.2.	<i>Prueba Friedman</i>	72

	CONCLUSIONES	74
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	75
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Composición del petróleo.....	6
Tabla 2-2: Funciones de activación.....	18
Tabla 3-2: Características de DWSIM por plataforma.....	27
Tabla 1-3: Datos del sistema de intercambiadores.....	38
Tabla 2-3: Datos del método ASTM D86.....	39
Tabla 3-3: Destilación TBP de la mezcla de crudo.....	40
Tabla 4-3: Datos de las corrientes del proceso.....	41
Tabla 5-3: Variables de entrada de la RNA.....	52
Tabla 6-3: Variables de salida de la RNA.....	52
Tabla 7-3: Datos generados para el entrenamiento y prueba de la RNA.....	52
Tabla 1-4: Presupuesto del trabajo de titulación.....	62
Tabla 2-4: Cronograma del trabajo de titulación.....	63
Tabla 3-4: Resultados de la columna de destilación C-1.....	65
Tabla 4-4: Resultados de la columna de destilación C-2.....	65
Tabla 5-4: Resultados de la validación de la simulación.....	66
Tabla 6-4: Resultados de la comparación de valores reales y predichos.....	70
Tabla 7-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Nafta Ligera.....	71
Tabla 8-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Nafta Pesada.....	71
Tabla 9-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Queroseno.....	71
Tabla 10-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Gasóleo.....	71
Tabla 11-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Fuel Oil.....	72
Tabla 12-4: Resultados de la prueba Friedman en Nafta Ligera.....	73
Tabla 13-4: Resultados de la prueba Friedman en Nafta Pesada.....	73
Tabla 14-4: Resultados de la prueba Friedman en Queroseno.....	73
Tabla 15-4: Resultados de la prueba Friedman en Gasóleo.....	73
Tabla 16-4: Resultados de la prueba Friedman en Fuel Oil.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Destilación atmosférica de crudo	13
Figura 2-2: Destilación al vacío de crudo	13
Figura 3-2: Neurona biológica	15
Figura 4-2: Modelo de neurona artificial	16
Figura 5-2: Funciones de transferencia	19
Figura 6-2: RNA monocapa y multicapa	20
Figura 7-2: RNA Perceptrón simple	21
Figura 8-2: RNA Perceptrón multicapa	22
Figura 9-2: RNA de retropropagación	23
Figura 10-2: Programas, objetivos y estrategias del PNGE.....	32
Figura 1-3: Diagrama de flujo de proceso	36
Figura 2-3: Pestaña de inicio de DWSIM	41
Figura 3-3: Selección de paquetes termodinámicos.....	42
Figura 4-3: Ingreso de datos de la curva de destilación TBP.....	43
Figura 5-3: Ingreso de los métodos y correlaciones.....	43
Figura 6-3: Propiedades de los pseudocomponentes creados	44
Figura 7-3: Especificaciones de la entrada de crudo.....	44
Figura 8-3: Sección de intercambiadores de calor	45
Figura 9-3: Operación de C-1 en ChemSep.....	46
Figura 10-3: Condiciones de C-1	46
Figura 11-3: Especificaciones del horno H-1.....	47
Figura 12-3: Operaciones de la columna C-2	48
Figura 13-3: Especificaciones de la columna C-2.....	48
Figura 14-3: Especificaciones de los bloques de recirculación	49
Figura 15-3: Especificaciones de los bloques de separación de compuestos.....	50
Figura 16-3: Resultados mostrados en DWSIM	51
Figura 17-3: Variables en forma de vectores	56
Figura 18-3: Ventana de la herramienta nntool	57
Figura 19-3: Propiedades de la RNA	57
Figura 20-3: Arquitectura de la RNA	58
Figura 21-3: Parámetros de entrenamiento de la RNA	59
Figura 22-3: Entrenamiento de la RNA	60
Figura 1-4: Validación de la simulación en DWSIM.....	64
Figura 2-4: Resultados del entrenamiento de la RNA	68

Figura 3-4: Correlación del entrenamiento de la RNA	69
Figura 4-4: Relación de datos simulados y reales.....	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Metodología del trabajo de titulación.....	34
--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DATOS EXPERIMENTALES

ANEXO B: COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y REALES

ANEXO C: DATOS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

ANEXO D: CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE NORMATIVA

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute
BPA	Flujo de recirculación inferior
CS	Crudo salado
F.O	Fuell oil
FCC	Craqueo Catalítico Fluido (en inglés fluid catalytic cracking)
G	Gasóleo
GLP	Gas Licuado de Petróleo
H.L	Nafta ligera
H.N	Nafta pesada
IA	Inteligencia Artificial
MSE	Error cuadrático medio
PFE	Punto final de ebullición
PIE	Punto inicial de ebullición
PR	Peng-Robinson
Q	Queroseno
RNA	Red Neuronal Artificial (en inglés ANN, artificial neural network)
T	Temperatura
TBP	“True Boiling Point” o verdadero punto de ebullición
TPA	Flujo de recirculación superior
TRAINLM	Levenberg-Marquardt

RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo la simulación y validación de la unidad de fraccionamiento de crudo, que fue utilizada como base para la creación de una red neuronal artificial (RNA) que tenga la capacidad de predecir las fracciones de los productos obtenidos después de la destilación del crudo. En la creación de la RNA se utilizó un banco de datos de 150 valores para cada variable: flujo de crudo, temperatura de horno, nafta ligera, nafta pesada, queroseno, gasóleo y fuel oil; obtenidos de la simulación creada. La arquitectura que tiene la RNA se divide en: una capa de entrada (2 neuronas), tres capas ocultas (50 neuronas) y una capa de salida (6 neuronas); esta arquitectura se basa en el tipo de red Feed-forward backprop y tiene un algoritmo de entrenamiento basado en Levenberg-Marquardt (TRAINLM). En esta red se obtuvo un error cuadrático medio de 0,0016801 con un nivel de correlación de 0,9954; validándose mediante pruebas estadísticas comparativas como la prueba Kruskal-Wallis y la prueba Friedman en donde se compararon los datos reales y predichos, tomado como regla que los valores de prueba obtenidos no deben superar el valor de 3,8415 para aceptar la hipótesis nula, resultando en que para todos los productos se acepta la hipótesis nula que dicta la existencia de una similitud entre estos dos grupos de valores. Es recomendable elevar el rango de alcance de la RNA ya que se puede aplicar a nuevas herramientas e investigaciones en procesos de refinación de crudo, asegurando mayores eficiencias en estos procesos.

Palabras clave: <INGENIERÍA QUÍMICA>, <DESTILACIÓN DE CRUDO>, <DWSIM (SOFTWARE)>, <REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)>, <MATLAB (SOFTWARE)>.

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.11.19
09:03:12 -05'00'



2122-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

ABSTRACT The objective of this research work was the simulation and validation of the crude oil fractionation unit, which was used as the basis for the creation of an artificial neural network (ANN) capable of predicting the fractions of the products obtained after crude oil distillation. In the creation of the ANN, a data bank of 150 values was used for each variable: crude oil flow, furnace temperature, light naphtha, heavy naphtha, kerosene, diesel oil and fuel oil; obtained from the simulation created. The ANN architecture is divided into: an input layer (2 neurons), three hidden layers (50 neurons) and an output layer (6 neurons); this architecture is based on the Feed-forward backprop network type and has a training algorithm based on Levenberg-Marquardt (TRAINLM). In this network, a mean square error of 0.0016801 was obtained with a correlation level of 0.9954; validating it by means of comparative statistical tests such as the Kruskal-Wallis test and the Friedman test where the real and predicted data were compared, taking as a rule that the test values obtained should not exceed the value of 3.8415 to accept the null hypothesis, resulting in that for all the products the null hypothesis that dictates the existence of a similarity between these two groups of values is accepted. It is advisable to raise the range of scope of ANN as it can be applied to new tools and research in crude oil refining processes, ensuring greater efficiencies in these processes.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING>, <CRUDE OIL DISTILLATION>, <DWSIM (SOFTWARE)>, <ARTIFICIAL NEURON NETWORKS (ANN)>, <MATLAB (SOFTWARE)>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Desde su descubrimiento el petróleo ha conferido enormes riquezas a las regiones o países donde se ha podido encontrar y América latina no es la excepción. En el Ecuador la era petrolera comienza con la perforación del primer pozo petrolero en su jurisdicción denominado Ancón 1, ubicado en la provincia de Santa Elena en el año de 1911, produciéndose un crecimiento significativo de la economía del país, en años posteriores se descubren nuevos yacimientos en la amazonia ecuatoriana pero el crudo encontrado en esta región es de menor calidad que el encontrado en la costa ecuatoriana (Castro, y otros, 2007 pág. 7).

La economía ecuatoriana a partir de la década de los 70 se sustentaba principalmente de la venta de petróleo, por ende se correlacionaba directamente con la gran variabilidad de los precios internacionales de crudo, por tanto las caídas en los precios significaba que la economía ecuatoriana también se veía afectada, además es sabido que los precios del petróleo se basan en factores externos fuera de la influencia del país, generando una situación preocupante ya que en gran medida se convierte el país en un ente dependiente de sectores económicos extranjeros (Sarango, 2016 pág. 7).

Ya que la industria petrolera es muy importante en el país se debe tratar de mejorar los procesos de refinación de crudo que ya existen, por tanto, se debe tratar de esclarecer el funcionamiento de los sistemas de fraccionamiento y destilación del petróleo ya que estos sistemas desde hace vario años son utilizados de manera principal en la industria química y petrolera, en refinerías, tratamientos de gas natural y diversos sistemas de acondicionamiento. El objetivo principal de este sistema es cumplir con las diversas especificaciones de calidad en productos, que normalmente son monitoreados de manera remota y para el cumplimiento de normas de calidad internacionales (Dávila, 2013 pág. 5).

En el caso de la destilación del petróleo se utiliza en gran medida la destilación multicomponente ya que el tipo de alimentación que reciben las refinerías contiene una composición muy compleja, ya que el crudo que se dispone a rectificar contiene un gran conjunto de hidrocarburos que permanecen en varias fases (gas, liquido, solido) además pueden contener compuestos inorgánicos. El conjunto de hidrocarburos que se puede encontrar en el crudo puede variar desde un carbono hasta más de cincuenta, por tanto, el intervalo de puntos de ebullición para estos compuestos a una presión atmosférica puede variar desde los -162 °C a los 538 °C, adicional a esto se toma en cuenta la variante volatilidad de los compuestos (Green, y otros, 2008).

En los últimos años se ha podido observar el creciente interés de la aplicación de nuevos métodos de solución de problemáticas con la aplicación de procesos provenientes de nuevos sectores del conocimiento y una de las técnicas más utilizadas es la inteligencia artificial (IA) que fue desarrollada por las Ciencias de la Computación en los años 60, creando un gran número de herramientas que se aplican en el sector científico y tecnológico. El éxito de estas herramientas está ligado al desarrollo de nuevos hardwares y softwares que permiten almacenar grandes cantidades de información, así como también los fundamentos principales de la IA busca dar soluciones a problemas que las ecuaciones matemáticas más habituales no pueden resolver, logrando crear nuevos métodos capaces de poder analizar y controlar problemáticas de carácter no lineal o lógico (Fernández, 2007 págs. 30-31).

Actualmente la simulación se ha convertido en una herramienta muy importante para la optimización, el análisis ya la síntesis de un proceso, la simulación se puede definir como una copia computacional de un proceso real, que permite obtener datos a partir de varios modelos ideales. En Ingeniería Química se comprende a la simulación como la solución de las ecuaciones de energía o materia en estado dinámico o estacionario. Las ventajas más importantes de las simulaciones son: la capacidad de evaluar y comprobar un proceso químico antes de aventurarse a realizar un gasto monetario o de recursos, poder documentar y registrar que cumpla con las normas ambientales del país en donde se esté realizando, permite la detección de errores de diseño o calculo ahorrando tiempo y dinero (Paz, 2013 pág. 23).

1.2. Planteamiento del problema

Aunque el sol en la actualidad proporciona el 99.8 % de la energía que se tienen en el planeta la fuente de energía que más se utiliza es la proveniente de la industria petrolera que tienen un consumo de un millón de toneladas de crudo por hora lo que también representa al 0.0005 % de la energía que el sol proporciona.

La industria petrolera en los últimos 50 años se ha mantenido como un sector de vital importancia para mantener la calidad de la vida moderna, debido a que la mayoría de los productos que se utilizan diariamente son derivados del oro negro como también se lo conoce. Por este grado de importancia que tiene en la sociedad se debe tener bien controlado y optimizado el proceso de refinación para poder obtener una eficiencia adecuada en comparación con los gastos de producción.

El crudo que se extrae de los diferentes yacimientos no siempre tiene iguales características en sus componentes debido a la naturaleza de la roca madre en la cual se encontraba entonces es simple pensar que los parámetros de las refinerías se deberían mantener cambiantes debido a esta gran diferencia de crudos a fraccionarse pero en la realidad no es así por ende se debería contar

con herramientas capaces de simular la naturaleza cambiante de las materias primas que se utilizan en estos procesos de fraccionamiento.

En las refinerías se capta el crudo extraído de los pozos y se lo destila en torres de fraccionamiento para separar los componentes por diferentes puntos de ebullición esta etapa de la refinación es una de las más controladas debido a que los productos fraccionados que resultan de esta sirven de materia prima para los demás procesos de refinación y de existir algún error en los parámetros de las torres de fraccionamiento significarían varias pérdidas económicas.

Para poder solucionar este tipo de problemas el presente proyecto de titulación se planteó el realizar la simulación y validación de un sistema de fraccionamiento de última tecnología para la separación de los componentes del crudo mediante la plataforma de procesos químicos DWSIM, comparando los valores con procesos ya simulados en artículos de alto impacto analizando así la eficiencia y cambios que se presentes en el proceso.

1.3. Justificación del proyecto

El fraccionamiento del crudo es de vital importancia si no el más importante debido a que en esta etapa se produce la separación de los diferentes componentes que servirán de materias primas para los demás procesos de refinación y de realizarse de ineficiente forma producirían una pérdida de dinero muy elevada como también un alto grado de contaminación para el medio ambiente.

Por esta razón las herramientas tecnológicas son muy importantes para los procesos de producción y por ende se ha optado por la simulación de un sistema de fraccionamiento para la separación de los componentes del crudo en el sistema de modelado de DWSIM para poder obtener una visión de las propiedades y cantidades de productos sin tener que arriesgarse a posibles pérdidas de producción en una refinería, aumentando con esto la eficiencia de las diversas torres de fraccionamiento que se utilizan.

Además, se puede aplicar nuevas instalaciones u optimizaciones a diferentes parámetros que constituyen la etapa de destilación de crudo, midiendo así la factibilidad de instalarlas y estudiando fácilmente que cambios pueden realizarse para obtener mayor rentabilidad en etapa de producción.

Es posible también estudiar que parámetros se deben modificar para reducir la presencia de componentes no deseados en los productos finales sin arriesgar instalaciones reales reduciendo así una de las mayores problemáticas de los tiempos modernos como es la contaminación ambiental y las fuentes contaminantes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Simular y validar un sistema de fraccionamiento para la separación de los componentes del crudo en procesos de refinación mediante el software de simulación de procesos DWSIM.

1.4.2. Objetivos Específicos

- ❖ Simular la unidad de fraccionamiento de crudo por medio de la plataforma de procesos químicos de código abierto DWSIM.
- ❖ Validar el sistema de fraccionamiento de crudo por medio del análisis y comparación de los datos obtenidos en la simulación, con datos obtenidos de un estudio bibliográfico.
- ❖ Diseñar una Red Neuronal Artificial que sea capaz de predecir las cantidades de los componentes fraccionados en la unidad de destilación de crudo por medio de las condiciones asignadas a las columnas de fraccionamiento.

1.5. Alcance

En el presente trabajo de titulación se busca realizar la simulación de un sistema de fraccionamiento de crudo con dos torres de destilación que funcionan en conjunto con un sistema completo de intercambiadores de calor que busca aprovechar la energía absorbida por las líneas de alimentación al ser calentadas, la dificultad que se presenta en los proyectos que tienen que ver con el petróleo está en la capacidad que este tiene de contener un conjunto enorme de compuestos derivados de hidrocarburos y compuestos inorgánicos que tienen características fisicoquímicas muy diversas entre sí. Por tanto, se opta por la utilización del software especializado en procesos químicos denominado DWSIM que contiene varias herramientas para poder simular correctamente las múltiples composiciones del crudo en la vida real.

En la validación de esta simulación se comprueba que los valores que se van a obtener son fiables para la creación de un conjunto de datos que serán utilizados en la creación de una Red Neuronal Artificial (RNA) capaz de predecir las propiedades de los productos del sistema de destilación de crudo por medio de las composiciones de los flujos de alimentación y las características estructurales que adopten las columnas de destilación, también se puede estudiar el nivel de influencia que tendrán las variables de entrada con los resultados obtenidos y por ende permite generar criterios de optimización en los procesos de refinación estudiados.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

2.1.1. *El petróleo*

El término petróleo nace del conjunto de términos latinos conocidos como “*petro*” que significa roca y *óleum* o aceite que definen al término como “aceite de roca”. Esta sustancia es una muy compleja mezcla de compuestos derivados de los hidrocarburos que se generan en un tipo de roca. Se piensa que el origen del petróleo está en la “descomposición de materia orgánica” que ocurren en intervalos de tiempo muy extensos y expuestos a condiciones de temperatura y presión muy altos (PETROECUADOR, 2013 pág. 13).

2.1.1.1. *Características físico-químicas del petróleo*

Los diferentes tipos de petróleo cuentan con diferentes características químicas y físicas ya sea: color, sabor, olor, índice de refracción, densidad, puntos de ebullición y fusión, poder calórico, viscosidad entre otros. El color del crudo puede variar en función de la cantidad de luz que puede refractar esta sustancia, puede asumir colores que van desde el amarillo pálido hasta llegar al negro pasando por tonalidades verdes, azules, rojas y marrones. Estos colores también pueden describir si se trata de crudos livianos, pesados o extrapesados ya que asumen un color más oscuro mientras más pesado es el crudo. Otro indicador es el olor que normalmente es aromático similar a las gasolinas y si el olor es fuerte puede indicar presencia de azufre, si el olor es irritante el crudo contiene sulfuro de hidrógeno, dependiendo del tipo de olor se puede describir al petróleo como dulces o agrios. La densidad es la característica de control más habitual para saber qué calidad tiene un tipo de crudo ya que se correlaciona con la medida de los grados API que es la escala de la gravedad específica producida por el “American Petroleum Institute” (PETROECUADOR, 2013 pág. 15).

2.1.1.2. *Composición del petróleo*

El petróleo es una mezcla heterogénea de sustancias en su mayoría hidrocarburos, además contiene azufre, oxígeno, nitrógeno y varios compuestos minerales. Además, se puede encontrar gases disueltos en proporciones variables. Las propiedades fisicoquímicas de los petróleos son

variantes entre sí y dependen en gran medida de las proporciones de los hidrocarburos que los conformen (Pinos, 2008 pág. 27).

A pesar de que el petróleo se encuentra en casi todos los países en condiciones diferentes, la composición de los diferentes crudos se mantiene en límites específicos, los elementos más comunes son los que se detallan en la tabla.

Tabla 1-2: Composición del petróleo

Elemento	Porcentaje
Carbono	83-87
Hidrogeno	11-15
Azufre	0,1-6,0
Nitrógeno	0,1-1,5
Oxígeno	0,3-1,2

Fuente: (Pinos, 2008 pág. 27).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Para determinar el precio del crudo se toma en cuenta dos aspectos muy importantes que son: la densidad API y el contenido de azufre. Los crudos que en su composición contienen un porcentaje de azufre mayor a 0,5 % se consideran de menor calidad ya que para la refinación de estos crudos es necesario la implementación de un proceso de hidrogenación debido principalmente que el azufre es el principal causante de envenenamiento en los catalizadores que se utilizan en este proceso. Los compuestos de azufre son muy complejos y son térmicamente inestables (Pinos, 2008 pág. 28).

En la mayoría de los crudos extraídos la presencia de nitrógeno es generalmente baja considerándose en los rangos de 0,1 a 1,5 % esto debido a que este elemento se presenta como un constituyente de algunos compuestos. Al aumentar el punto de ebullición de las fracciones del crudo se aumenta también la presencia de compuestos nitrogenados los mismos que son térmicamente estables por lo que se aglomeran básicamente en las resinas y los asfaltos. La presencia del nitrógeno en las fracciones del petróleo es indeseable debido que estos compuestos se oxidan fácilmente con el aire formando resinas y envenenando los catalizadores (Pinos, 2008 pág. 29).

En el petróleo el oxígeno se presenta en compuestos como ácidos carboxílicos, fenoles, cetonas, ésteres, lactonas, anhídridos y compuestos derivados del furano. Los asfaltos que es la fracción más pesada del crudo contienen compuestos altamente oxigenados. Debido a la naturaleza acida de los compuestos oxigenados estos deben ser eliminados del crudo antes de ser sometido a refinamiento. El petróleo y sus derivados contienen varios compuestos minerales, pero en cantidades pequeñas los más representativos en su mayoría son metales como: Vanadio, Cromo, Níquel, Hierro, Molibdeno, Cobre, Plomo, Plata, Cobalto, Magnesio, Titanio, Sodio, Potasio,

Bario, Calcio, Germanio, Fosforo, Silicio, Aluminio, Zinc. Todos estos elementos se consideran como generadores de cenizas (Pinos, 2008 págs. 30-32).

2.1.1.3. Refinación del petróleo

Según el texto manual de (PETROECUADOR, 2013 pág. 96) en la etapa de refinación o también denomina “downstream” el crudo y el gas son expuestos a varios sistemas de transformación capaz de separar los productos ya conocidos del petróleo. Para lograr este fin se necesitan enormes plantas de procesamiento denominadas como refinerías. En estas plantas de refinación el crudo tiene que pasar por varias etapas de transformación para poder obtener gasolinas, querosenos, asfaltos, GLP entre otros. El crudo no se extrae de forma pura ya que este contiene compuestos inorgánicos y minerales que son considerados como impurezas. El primer paso ya en la refinería es desalar el crudo ya que contiene una cantidad de agua salada proveniente del yacimiento donde se instaló el pozo que lo extrajo. Ya desalado el crudo pasa a un horno en el cual se eleva la temperatura hasta los 350 °C para ser ingresado a una columna de destilación que funciona a presión atmosférica, en este punto se da la primera separación del crudo en sus componentes debido a los diferentes puntos de ebullición. Esta columna de destilación contiene en su interior una cantidad de separaciones o platos que mantiene independientemente diferentes temperaturas que causan la condensación y separación de los productos contenidos en la alimentación del crudo.

En las torres de destilación se recoge los residuos más pesados para ser enviados a otras columnas de rectificación que funcionan al vacío pudiendo reducir los puntos de ebullición y obteniendo los denominados gasóleos que son la materia prima para la planta de craqueo catalítico fluido (FCC) que genera gasolinas de alto octanaje y gas licuado de petróleo. Las naftas obtenidas en las columnas de destilación atmosféricas normalmente contienen octanajes muy bajos que van de los 50 a 60 octanos y por tanto con menor potencia explosiva. Para mejorar esta característica es necesario utilizar reactores químicos capaces de transformar la naturaleza química de las naftas como unidades de FCC y otras que ayudan a mejorar la calidad de las gasolinas disminuyendo el contenido de azufre y elevando el octanaje (PETROECUADOR, 2013 pág. 96).

2.1.2. Simulación de procesos químicos

El nacimiento de la simulación se originó en la Segunda Guerra mundial con los catedráticos en matemáticas J. V. Neumann y S. Ulam que tenían el desafío de solucionar una problemática compleja que explicaba el comportamiento de los neutrones, este problema era demasiado complejo para ser resuelto analíticamente y resultaba demasiado costoso hacerlo mediante prueba y error. La evolución tecnológica con respecto a la simulación de procesos creció en gran medida

en los años 1966-1968 donde aparecen por primera vez paquetes de simulación, capaces de resolver balances de materia y energía en procesos estacionarios. El “PACER” y el “CHESS” fueron los primeros paquetes desarrollados en universidades norteamericanas y el “FLOWTRAN” creado por Monsanto. En los años 70 los cálculos se volvieron más complejos, se mejoraron los modelos predictivos de las propiedades fisicoquímicas y se aumentó las unidades de procesamiento junto con la capacidad de almacenamiento de información. Ya en los años 80 se comienza con el desarrollo del software que contiene paquetes de simulación muy complejos y mucho más comerciales, generando programas interactivos como: Aspen, Hysys, Chemcad, etc. Esto generó el comienzo de la revolución tecnológica en simulación de procesos químicos (Paz, 2013 pág. 24).

2.1.2.1. Simulador DWSIM

Los grandes simuladores de procesos industriales, como Aspen Hysys si bien son muy eficaces, siempre suelen tener un costo que puede no ser tan accesible para empresas pequeñas, universidades y estudiantes. Por esta razón es que el simulador DWSIM es de gran importancia debido a que es un simulador de procesos, de código abierto, descarga libre y gratuita. El sitio oficial de DWSIM se encuentra en dwsim.inforside.com.br. En ese sitio se puede descargar un addin de Excel para cálculos termodinámicos. Este addin permite hacer cálculos de propiedades termodinámicas de compuestos puros y de mezclas de una sola fase directamente en Excel, para integrar dentro de otras planillas de cálculo o modelos que se tenga ya implementados. Si bien el software es totalmente gratuito, el sitio oficial incluye un enlace que puedes usar para hacer una donación al autor. DWSIM fue desarrollado originalmente por Daniel Medeiros, un ingeniero de procesos brasileño, en 2006, al que luego se le sumó Gregor Reichert (DWSIM, 2020).

2.1.2.2. Simulador Aspen HYSYS

Este software de simulación de procesos es una herramienta muy utilizada por su poder de procesamiento, se utiliza para replicar plantas derivadas de la industria petroquímica y sectores productivos afines, este programa ha sido diseñado tomando en cuenta varios aspectos como: la arquitectura, la operación interactiva, varios paquetes termodinámicos e interfaces amigables con el usuario. Tiene la capacidad de simular procesos dinámicos y estacionarios, para este fin contiene una de las librerías de componentes más grandes en el mercado de los simuladores haciéndola una herramienta muy poderosa para la réplica de procesos industriales. Los paquetes de propiedades permiten crear modelos más cerca de la realidad, lo que ayudó al rápido avance en la utilización de esta herramienta en las áreas de desarrollo, investigación y diseño. Esta

plataforma sirve a las ingenierías, más precisamente en la formación académica de las universidades, en cursos de posgrado de la industria petroquímica (Martínez, y otros, 2015 págs. 24-25).

2.1.2.3. Simulador ChemCAD

Este simulador posibilita a las personas que lo utilizan evaluar un determinado proceso o equipo mediante la réplica de su funcionamiento, como también permite supervisar su operación en función del tiempo, se puede explorar también las dimensiones que van a conformar los equipos, con esta información los usuarios pueden brindar nuevas opciones de operación mediante la modificación de las variables que rigen a un determinado proceso. Además, ponen al alcance de los usuarios una amplia lista de componentes y deja la posibilidad de ingresar nuevos, entre varias características más. Se puede afirmar que cualquier estudiante que ya tenga un cierto nivel de preparación en su carrera podría engrandecer sus habilidades en la evaluación de procesos con la utilización de este programa. Una de las dificultades que tiene el programa es que para poder simular un cierto sistema se debe necesariamente dominar todos los aspectos del proceso o equipo que se desea simular ya que debe ser capaz de conocer qué tipo de paquete termodinámico utilizar, o que variables se determinan como salidas o entradas, todo esto conlleva a poder comprender las principales ventajas y las desventajas de la utilización de este programa computacional (Toselli, y otros, 2009 pág. 20).

2.1.3. Redes Neuronales Artificiales (RNAs)

Los procesos industriales en su mayoría no son lineales lo que dificulta enormemente el cálculo por los métodos habituales por tanto la búsqueda de nuevas técnicas de análisis de datos es necesaria. Las redes neuronales artificiales (RNA) es un modelo que pretende simular los procesos de aprendizaje biológicos y por ende emplean funciones del sistema neuronal humano. Estas redes crean una conexión entre los datos de entrada y las salidas mediante la complejidad de las capas internas u ocultas dentro del sistema mediante una función de activación y la adopción de valores denominados pesos en cada neurona de la capa oculta (Valles, 2006). En la aplicación de estas RNA los algoritmos pueden aprender de las repeticiones como también tienen alta tolerancia a las variaciones de datos, por esto pueden ser capaces de solucionar problemas no lineales. Después de completar el entrenamiento son capaces de la predicción y la generalización de manera inmediata (Sozen, y otros, 2004 pág. 43).

2.1.3.1. RNA en procesos químicos

Como ya se explicó las capacidades de las RNA son muy amplias y se pueden aplicar a varios sectores de la sociedad, pero hay que concentrarse en las aplicaciones de los procesos químicos y de transformación. Para comenzar (Sánchez, y otros, 2015 pág. 3) crearon una red neuronal artificial de tipo feedforward que contiene una capa oculta y es entrenada por el algoritmo backpropagation (BP) mientras que el ajuste de los pesos sinápticos lo realiza mediante la función Levenberg-Marquardt (LM), esta RNA es capaz de predecir la velocidad del proceso de extracción de aceite de canola con hexano. Las variables que utiliza son el tiempo de extracción, la temperatura de trabajo y el rendimiento en base seca obtenido de una extracción en un reactor batch completamente agitado.

Una RNA se puede aplicar casi en todos los aspectos de la vida cotidiana solo se necesita un conjunto de datos lo suficientemente grande para su adecuado entrenamiento. Se creó una red neuronal artificial para estimar el índice de calidad de agua, en donde la red tiene el objetivo de predecir las diferentes propiedades químicas y físicas que pueden afectar la calidad del agua, para este modelo se utiliza el tipo de red perceptrón multicapa dispuesto con 6 neuronas de entrada, 12 en la capa oculta y una neurona a la salida con el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt (LM) en el software Matlab, el agua estudiada es la proveniente del río Utcubamba (Bazán, y otros, 2020 pág. 109).

En el trabajo de doctorado presentado por (Osorio, 2015 pág. 5) creó una RNA para realizar el control de manera eficiente de la composición de la salida de dióxido de carbono en una columna de absorción en el laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la Universidad del centro del Perú. Esta red consta de una capa de entrada, una capa escondida y una capa de salida. El algoritmo de entrenamiento que se utilizó es el de retropropagación siendo validado de manera experimental en un sistema de absorción con reacción química. La variable que fue controlada es la cantidad molecular de dióxido de carbono que se presenta en la salida del proceso mediante la manipulación de la velocidad de la alimentación de hidróxido de sodio.

Se estableció una red neuronal artificial para el diseño de protecciones cerámica-metal que se exponen a impactos a altas velocidades, esta red es capaz de predecir el comportamiento de la protección al momento de impactarse a altas velocidades, ya que puede controlar si existió una perforación en la protección o si se produce la parada del cuerpo que impactó, el banco de datos se generó mediante la simulación del comportamiento de las protecciones al ser impactadas por diferentes objetos, el algoritmo que se encarga de la interacción se generó específicamente para esta red, para el entrenamiento se utiliza el algoritmo de retropropagación de PMC (Fernández, 2007 pág. 8).

2.1.3.2. RNA en procesos de destilación

Se presento una RNA capas de predecir la concentración de etanol en una destilería, en la arquitectura de la red se utilizó el perceptrón multicapa ya que la naturaleza de los datos es adecuado para este tipo de algoritmo, se comprobó la concentración de etanol a la salida de los destiladores, para el diseño y la estructuración de la red se utiliza el software MATLAB en la versión 2013, la red se conformó por cuatro variables de entrada, seis neuronas en la capa oculta que brindan un error cuadrático medio de 0,000434 y un valor de correlación entre los datos reales y los de la red de 0,916 (López de la Maza, y otros, 2018 pág. 2).

La RNA creada por (López, y otros, 2017 pág. 1) para columnas de destilación por lotes tiene una base radial en modelos dinámicos mediante un preprocesamiento de las alimentaciones y mediante un cambio de escala. Para poder comprender el comportamiento de la temperatura se toman datos a lo largo de todo el proceso, a estos datos se les aplica varias redes neuronales artificiales, se debe recalcar que se realiza este proceso hasta obtener un error cuadrático medio menor al 0,001. La característica principal de esta red es la capacidad demostrar la transición de la torre de destilación desde el punto frio hasta llegar al estado estacionario que es muy difícil representar con los métodos convencionales.

En la industria azucarera se ha llevado a cabo diversas RNAs como la red para la predicción de la calidad fisicoquímica de la mezcla de caña de azúcar en un destilador flash, en este proceso se utilizó dos modelos de tipo feedforward (FF), con el algoritmo de entrenamiento backpropagation (BP), con ajustes de los pesos sinápticos regidos a la función Levenberg-Marquardt (LM), con una estructura de seis variables de entrada y siete variables de salida con 9 neuronas en la capa oculta con la función tangente sigmoideal. Los parámetros de entrenamiento utilizados son: 0,5 de coeficiente de momento, una meta de error de 0,0001 en 20 etapas de entrenamiento (Lescano, y otros, 2010 pág. 63).

Se desarrollo una RNA para el proceso de destilación de crudo que permite el control en tiempo real de la unidad de destilación de crudo y para este tipo de proceso es muy interesante analizar las diferentes correlaciones que existen entre las variables ya que son muchas, esta red se enfoca en dos pasos, como primer punto se utiliza una red de tipo perceptrón multicapa y a continuación se introduce un operador de selección y contracción mínima absoluta o LASSO por sus siglas en inglés y ha demostrado que esta combinación de funciones permite construir un modelo valido capas de predecir las variables de salida del proceso (Sun, y otros, 2016 pág. 338).

Se modelo una RNA para la predicción del equilibrio líquido-vapor de las mezclas de etanol-agua mediante el modelo del perceptrón multicapa con el algoritmo de entrenamiento y aprendizaje denominado backpropagation en los softwares Matlab y KNIME 3.1.1, para estas simulaciones se utilizó un banco de datos validado por los procesos de las áreas de Herington y las pruebas

punto a punto diseñado por Wisniak, la estructura de la red conta de ocho neuronas en la capa intermedia u oculta obteniendo un error cuadrático medio de 0,0054 con el coeficiente de correlación entre los datos de 0,9729, esta red permite predecir en el intervalo de presiones de 6,6 kPa a 520 kPa el equilibrio líquido-vapor (Zumalacárregui, y otros, 2018).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Procesos de destilación de crudo*

El fraccionamiento de crudo se basa en un proceso de intercambio de masa y energía con el fin de separar las mezclas líquidas por medio de sus puntos de ebullición. Este proceso se lleva a cabo mediante el contacto de dos flujos, en fase gaseosa y fase líquida que mantienen diferentes composiciones y diferentes temperaturas que al entrar en contacto buscan alcanzar el equilibrio térmico. Estos procesos se pueden realizar por medio de sistemas discontinuos y continuos, en el primer caso las mezclas son fraccionadas en sus “componentes individuales” que mantienen distintos puntos de ebullición por medio de una extracción sucesiva. En el sistema continuo la destilación que se realiza posibilita la obtención de diferentes productos en el mismo intervalo de tiempo con la aplicación de condiciones “estacionarias” para el proceso (Pinos, 2008 págs. 45-46).

Los procesos de fraccionamiento se realizan en “columnas de rectificación”, que permiten crear un flujo de vapor mediante la aplicación de calor en parte inferior de la columna, se condensa el vapor de la parte superior de la columna para generar el reflujo líquido, al ingresar el crudo a las torres de destilación es separado en fracciones que mantienen intervalos estrechos de puntos de ebullición, el sistema cuenta con varias etapas de procesamiento como: calentamiento, fraccionamiento, condensación y enfriamiento (Pinos, 2008 pág. 46).

2.2.1.1. *Destilación atmosférica*

El flujo de crudo que se requiera destilar debe de estar ya previamente “desalado y estabilizado” pasando a ser calentado por medio de un conjunto de intercambiadores de calor que llevan el crudo a temperaturas de 250 a 280 °C, se lleva a un horno de tubos donde se eleva aún más la temperatura hasta llegar a los 350 a 370 °C ya con esta cantidad de energía es enviado el flujo caliente a las columnas de fraccionamiento. Ya en las columnas el flujo gaseoso proveniente de la parte inferior se eleva y se encuentra con el flujo condensado que se mueve en contracorriente, este flujo se condensa separándose de las fracciones más livianas que lo componen. El vapor y los gases que al ser más livianos se encuentran en la parte superior de la columna se recogen como: butano, propano, gasolinas y gases más livianos en conjunto con el vapor de agua residual (Pinos, 2008 pág. 46).

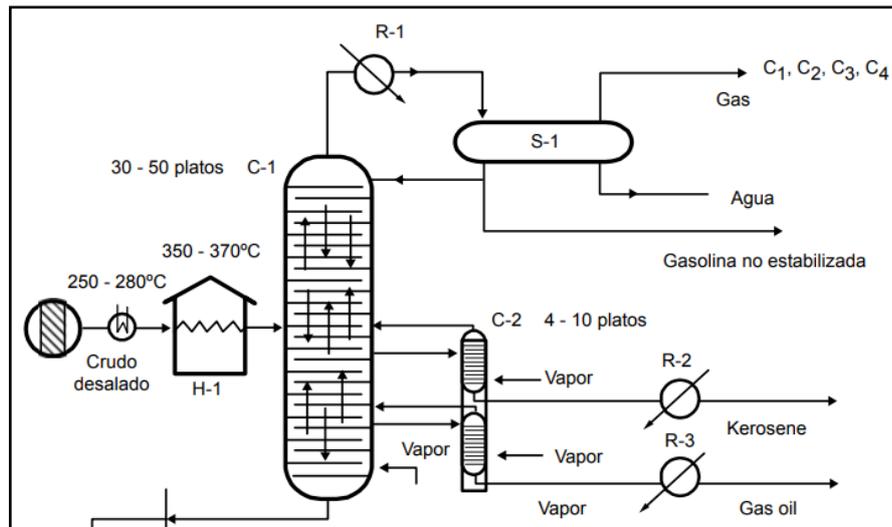


Figura 1-2: Destilación atmosférica de crudo

Fuente: (Pinos, 2008 pág. 47).

2.2.1.2. Destilación al vacío

Se recolectan los fondos de la columna de fraccionamiento atmosférica para servir de alimentación a una columna de destilación al vacío para poder obtener nuevos productos como: asfaltos y gas-oleos debido a que la utilización del vacío permite elevar la temperatura de los hidrocarburos pesados sin que se dé el “craqueo químico” que es el cambio de las estructuras moleculares de los hidrocarburos, este tipo de fraccionamiento se realiza a presiones de 25 a 40 mm de Hg, para poder generar el vacío necesario se utiliza generalmente eyectores que trabajan con vapor y condensadores barométricos (Pinos, 2008 pág. 47).

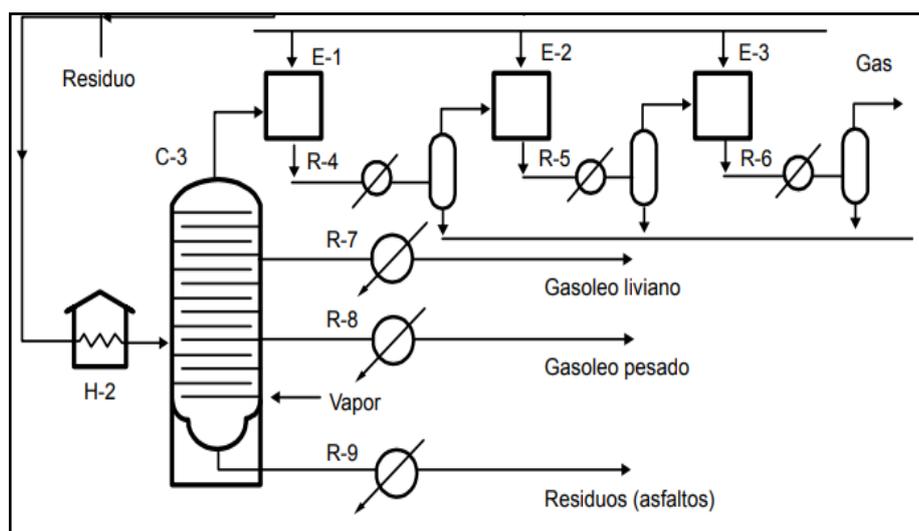


Figura 2-2: Destilación al vacío de crudo

Fuente: (Pinos, 2008 pág. 47).

2.2.1.3. *Productos de las columnas de destilación atmosférica y al vacío*

Entre la gran diversidad de componentes que constituyen el crudo en el proceso de fraccionamiento atmosférico y al vacío solo se pueden obtener materias primas para otros procesos de tratamiento químico y térmico que cambian la estructura molecular de los hidrocarburos que se expongan a estos procesos, entre los principales productos tenemos:

- ❖ **Gas.** – Son los componentes más ligeros que constituyen al petróleo y constan de diferentes usos como: el metano y el etano que sirven de combustibles para otros procesos en la misma refinería, los gases como el propano y el butano son constituyentes del GLP o gas licuado de petróleo que se utilizan en la industria y el hogar (Pinos, 2008 pág. 48).
- ❖ **Gasolina.** – Quizá sea el producto más reconocido de la refinación de petróleo, pero la gasolina que se obtiene de la columna de fraccionamiento no se encuentra estabilizada y tiene puntos de ebullición de 50 a 180 °C, ya siendo estabilizada se obtiene gasolina liviana y gasolina pesada, la primera ya “desulfurada” se utiliza comercialmente para el sector automotriz o se procesa mediante isomerización para obtener un octanaje adecuado, la gasolina más pesada se utiliza como alimentación en el proceso de “reformado catalítico” que es capaz de producir gasolinas con un alto índice de octanos y aromáticos (Pinos, 2008 pág. 49).
- ❖ **Querosene.** – Este producto es utilizado para la producción de combustibles para diversos reactores de tipo Jet-Fuel, para linternas y sirve de materia prima para el proceso de hidrocrqueo, el intervalo de ebullición se mantiene de 180 a 315 °C (Pinos, 2008 pág. 49).
- ❖ **Gas Oil.** – Se utiliza como combustible en general para los sistemas de “craqueo catalítico” e “hidrocrqueo” que sirven para obtener gasolinas de alto octanaje mientras que el gas oil más pesado sirve para obtener “aceites lubricantes”, este producto tiene un rango de ebullición de 315 a 360 °C (Pinos, 2008 pág. 49).
- ❖ **Crudo reducido.** – Este producto es el residuo que se obtiene de la columna de fraccionamiento atmosférica y se puede utilizar como combustibles para calderas, pero lo más usual es utilizarla como alimentación para la columna de destilación al vacío, los puntos de ebullición de este producto son mayores a 350 °C (Pinos, 2008 pág. 49).
- ❖ **Asfalto.** – Se obtiene en la parte inferior de la columna de destilación al vacío como el único producto que ya no se puede procesar y es la fracción más pesada del crudo, normalmente se utiliza en la construcción de carreteras (Pinos, 2008 pág. 49).

2.2.2. *Red Neuronal Artificial (RNA)*

El hombre siempre ha mirado la naturaleza y los fenómenos que en esta ocurren para poder obtener inspiración para varios sectores de la sociedad, uno de ellos es la tecnología y en este campo se ha logrado desarrollar herramientas sumamente sofisticadas, el cerebro humano siempre

ha sido un punto de partida para varias de estas herramientas y la denominada inteligencia artificial se reconoce como un tema muy popular, por tanto el diseño de una RNA se basa principalmente en tratar de replicar la sinapsis de las neuronas del cerebro humano para así poder replicar el pensamiento y análisis de una persona.

2.2.2.1. Fundamento biológico de la RNA

El proceso de transmisión de información entre neuronas en cerebros desarrollados se compone principalmente de tres partes que son (Isasi, y otros, 2004):

- ❖ El denominado sistema nervioso que se encarga de la recepción, almacenamiento y envío de información ya lista a los órganos que ejecutan las ordenes enviadas por este sistema.
- ❖ Los receptores que se localizan en las células que captan la información externa en forma directa por medio de estímulos.
- ❖ Los mecanismos u órganos efectores que solo los que captan y analizan la información previamente procesada por el sistema nervioso.

Las neuronas biológicas contienen ciertas características exclusivas que las diferencian de otros tipos de células, como la habilidad de comunicación entre neuronas (Bertona, 2005 pág. 5).

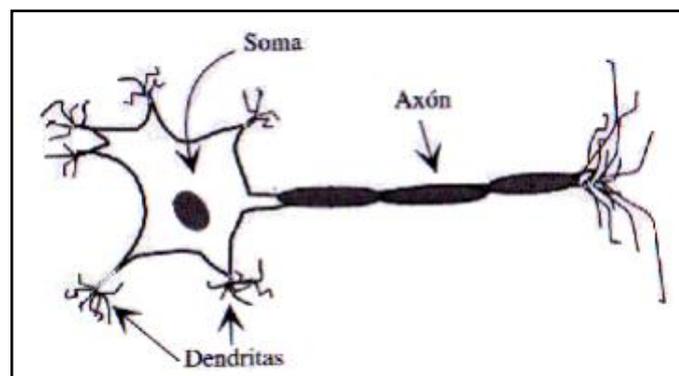


Figura 3-2: Neurona biológica

Fuente: (Bertona, 2005 pág. 5).

En la figura 3-2 se muestra la estructura de una neurona biológica compuesta por tres partes fundamentales el soma que constituye el cuerpo, las ramificaciones que salen del cuerpo denominadas dendritas y el axón que es una fibra ramificada en su extremo. El canal de comunicación de las señales exteriores son las dendritas que llevan la información al interior de la neurona a diferencia del axón que es el canal de salida. Los espacios que existen entre las neuronas se llama sinapsis que brinda la capacidad de comunicación que existe entre neurona y neurona, al observar un corte transversal del cerebro humano se puede diferenciar una estructura por capas y un ordenamiento de columnas entre neuronas. Las estructuras del cerebro no son

estáticas si no que se va modificando conforme se van creando nuevas conexiones ya se por modificación de la intensidad de sinapsis o por destrucción de neuronas (Bertona, 2005 pág. 5).

La característica principal de las neuronas es su capacidad de comunicación mediante el soma de las llamadas neuronas transmisoras que crean un “pulso eléctrico o potencial de acción”, este pulso se transmite por el axón que se encarga de transportarlo a la sinapsis. La información se transmite de neurona a neurona mediante un proceso químico que libera neurotransmisores, las neuronas receptoras captan estos neurotransmisores por medio de las dendritas que las trasmite al cuerpo neuronal, las señales pueden ser positivas o excitadoras mientras que al contrario pueden ser negativas o inhibitoras (Gurney, 1997 pág. 25). La parte encargada de integrar la información de la neurona es el soma que también mide la intensidad del pulso eléctrico que al llegar a un “determinado umbral” se emite una pulsación eléctrica transportada por el axón hacia otra neurona mediante los neurotransmisores (Nascimento, 1994 pág. 35).

2.2.2.2. Modelo de una neurona artificial

Las redes neuronales artificiales se basan estrictamente en simular el comportamiento de las neuronas biológicas por tanto son elementos simples que captan una señal de entrada para producir una señal de salida. Se pueden diferenciar tres tipos de neuronas artificiales que mantiene su contraparte biológica como (Bertona, 2005 pág. 7):

- ❖ Las neuronas de entrada que son las encargadas de recibir la información proveniente del exterior.
- ❖ Las neuronas ocultas que se encargan de recibir la información de otras neuronas artificiales, como también generar la sinapsis capas de representar la información proveniente de las neuronas de entrada.
- ❖ Las neuronas de salida que se encargan de captar la información ya procesada para enviarla al exterior.

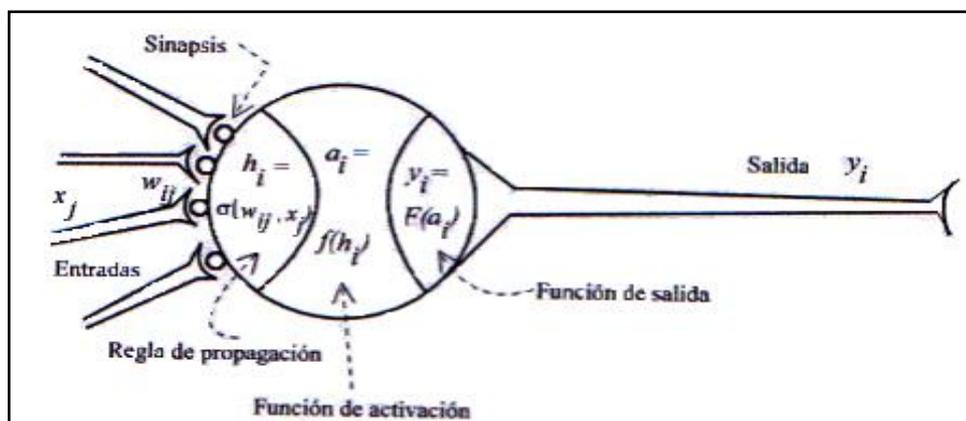


Figura 4-2: Modelo de neurona artificial

Fuente: (Bertona, 2005 pág. 5).

El la figura 4-2 se muestra la estructura de una RNA con todos sus componentes necesarios como: el conjunto de entradas $x_j(t)$ que pueden provenir de otras neuronas artificiales o del exterior, los pesos sinápticos w_{ij} que define el nivel de comunicación que existe entre la neurona artificial i con la neurona artificial j que puede ser positiva (excitadora) o negativa (inhibidora), la regla de propagación $\sigma_i(w_{ij}, x_j(t))$ que es la encargada de integrar la información de todas las neuronas artificiales brindando el valor presináptico de una neurona i , la llamada función de activación $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$ que brinda el valor que activa la neurona i terminando con la función de salida $F_i(a_i(t))$ que dictara el valor final de la neurona artificial i . Por este medio se puede definir la función de salida de la neurona artificial en un determinado instante de tiempo t una función matemática (Bertona, 2005 págs. 7-8).

$$y_i(t) = F_i(f_i[a_i(t-1), \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))])$$

2.2.2.3. Entradas y salidas neuronales

Este tipo de datos se clasifican en dos grandes conjuntos, las continuas y las binarias. Se entienden como neuronas binarias a las que solo admiten dos valores en alfabetos como (0,1) o (-1,1) a diferencia de las neuronas continuas que permite la utilización de valores en un determinado rango que se define como el conjunto de datos que van desde -1 a 1, para seleccionar que tipo de neuronas se debe utilizar hay que analizar la naturaleza de los datos que se utilizan (Bertona, 2005 pág. 8).

2.2.2.4. Pesos sinápticos

Estos pesos sinápticos definen la capacidad que tiene una conexión sináptica entre neuronas, estos procesos pueden adoptar valores negativos, positivos o cero. En el caso de que se presente un valor positivo el peso sináptico actúa como un agente excitador por tanto su contraparte negativa actuara como un inhibidor mientras que si el valor es cero quiere decir que no existe comunicación entre neuronas, al ajustarse los pesos sinápticos la red neuronal puede adaptarse a cualquier problema o situación mediante realiza una tarea definida (Bertona, 2005 pág. 8).

2.2.2.5. Regla de propagación

Esta regla define el potencial de interacción que tiene una neurona i con las N neuronas circundantes, la respuesta de esto se puede representar por la siguiente expresión:

$$h_i(t) = \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))$$

Aunque existen varias reglas de propagación la más utilizada es la que sigue el procedimiento de la suma de las “entradas ponderadas” manteniendo su respectivo peso sináptico (Bertona, 2005 pág. 9).

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} * x_j(t)$$

2.2.2.6. Función de activación

Se determina esta función en correlación con el “estado de activación” que mantiene una neurona con principio en el potencial sináptico denominado h_i con referencia del estado anterior de la misma neurona $a_i(t - 1)$, a pesar de que en la mayoría de los modelos creados suelen despreciar este último elemento dando como resultado una función matemática que define la activación de la neurona en un tiempo t (Bertona, 2005 pág. 9).

Tabla 2-2: Funciones de activación

Función	Formula	Rango
Identidad	$y = x$	$[-\infty, \infty]$
Escalón	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[0, 1]$
	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1 & \text{si } x > 1 \\ -1 & \text{si } x < -1 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Sigmoidea	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, 1]$
	$y = \tanh(x)$	$[-1, 1]$
Sinusoidal	$y = \text{Sen}(w \cdot x + \varphi)$	$[-1, 1]$

Fuente: (Bertona, 2005 pág. 9).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

- ❖ **Función lineal.** – Es una de las más utilizadas debido a que se maneja en el intervalo de valores de -1 a +1 dado que si el valor de salida de la neurona adopta la unidad positiva se determina que la entrada va a ser igual a la salida, siguiendo una correlación lineal en todo el intervalo de respuestas (Matich, 2001 pág. 14).
- ❖ **Función sigmoidea.** – Al momento de utilizar esta función se determinarán valores de salida en el intervalo de 0 a 1 y de modificarse los valores de la ganancia o el peso sináptico se notarán cambios en la pendiente de dicha función (Matich, 2001 pág. 14).
- ❖ **Función tangente hiperbólica.** – La respuesta de esta función está comprendida en el intervalo de -1 a +1 y se comporta de manera similar a la de la función sigmoidea al momento de variar la sinapsis entre neuronas se verá afectada la pendiente de la función (Matich, 2001 pág. 14).

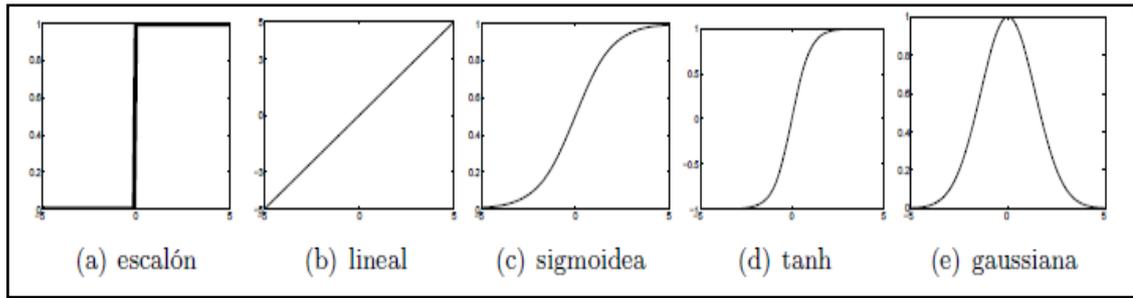


Figura 5-2: Funciones de transferencia

Fuente: (Morales, y otros, 2008).

2.2.2.7. Función de salida

La función de salida de una neurona artificial es solamente el valor que adopta está en cargo del “estado de activación” por lo general se utiliza una simple función identidad.

$$y_i(t) = F_i(a_i(t)) = a_i(t)$$

2.2.3. Arquitectura de una Red Neuronal Artificial

Este concepto hace referencia a la estructura de la red neuronal y las partes que la deben componer por regla general como son el número de capas ya sea de entrada, ocultas y de salida. Además, se debe tomar en cuenta la conexión que existe entre las neuronas y el tipo de neuronas que se establecen en cada capa como también el tipo de función que se utilizara para el entrenamiento de la red neuronal (InteractiveChaos, 2015).

Estas redes neuronales se las agrupan en “unidades funcionales” también llamadas capas, se distribuye en una capa de entrada en donde se muestran neuronas capaces de recibir la información del exterior de la red, se distingue también capas ocultas con neuronas que se caracterizan por contener un peso sináptico y para completar la red se establece una capa de salida que es la necesaria para transmitir la información creada por la red neuronal hacia el exterior. Al establecerse una conexión sináptica entre neuronas de la misma capa se denomina conexión intra-capas a diferencia de si la conexión se da entre neuronas de diferentes capas en donde se denomina conexiones inter-capas. Las redes neuronales pueden estar compuestas por una sola capa de neuronas y se la denomina monocapa en donde las neuronas cumplen con la función de entrada y de salida al mismo tiempo, si la red está compuesta de más capas se la llama red neuronal multicapa. Así también es necesario establecer si la conexión se realiza hacia adelante o “redes feedforward” que son las que mantienen el flujo de información en una sola dirección que va desde la entrada hacia la salida a diferencia de las redes en donde la conexión puede ser hacia adelante y hacia atrás que se denominan “redes feedback” (Bertona, 2005 pág. 10).

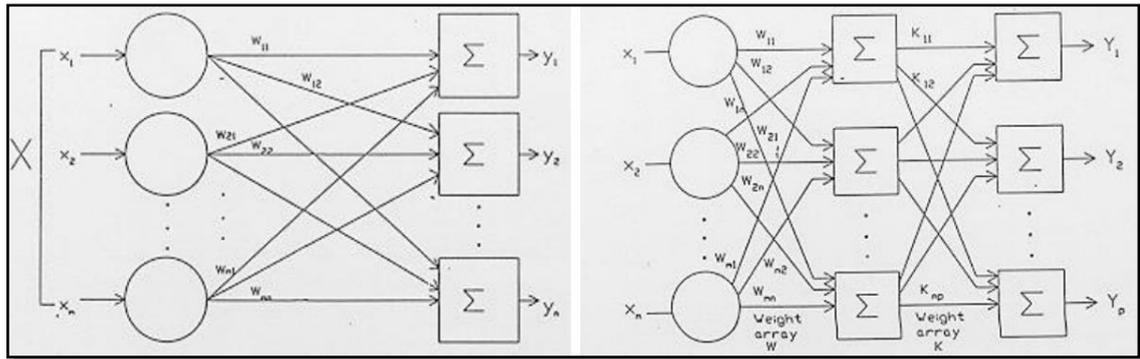


Figura 6-2: RNA monocapa y multicapa

Fuente: (Bosogain, 2015 pág. 16).

2.2.4. Tipos de RNAs

Las RNA se dividen en varios tipos con características diferenciales entre sí que son adecuadas para un tipo específico de datos en estudio, entre los principales están redes conocidas como: perceptrón, adeline, perceptrón multicapa, máquina de Boltzman, máquina de Cauchy, Red de aprendizaje asociativo, redes de Kohonen, Learning Vector Quantization (LVQ), Redes de Elman, Redes de Hopfield, Red Backpropagation.

2.2.4.1. Perceptrón

Es la RNA más conocida y la más antigua ya que fue creada en el año 1943, esta funciona sumando las señales de entrada para después multiplicar los pesos sinápticos seleccionados de manera aleatoria, estos valores resultantes son comparados con el potencial de activación y se establece si la neurona se activa o no, si el valor calculado supera el potencial de activación se obtendrá una salida en 1 caso contrario se obtiene una repuesta de 0 (Andrade, 2013 págs. 22-23).

La neurona principal de la estructura de un perceptrón simple “realiza la suma ponderada de las entradas, resta el umbral y pasa el resultado a una función de transferencia de tipo sigmoidea” para esta red es necesario un entrenamiento de tipo supervisado ya que se necesitan los valores de entrada y entrenamiento (Facultad de Ingeniería Eléctrica UTP, 2012).

Este tipo de red neuronal se utiliza para los problemas principales de clasificación ya que se obtiene las repuestas muy precisas y con errores muy pequeños si se da un entrenamiento satisfactorio (Andrade, 2013 pág. 23).

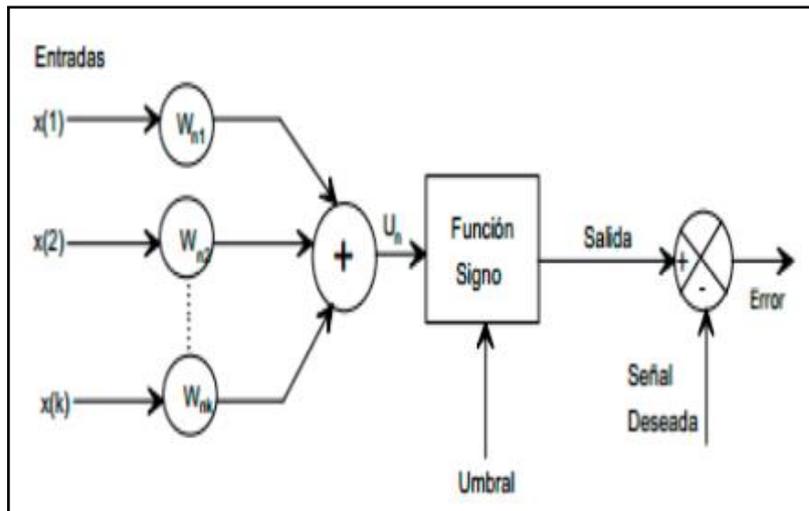


Figura 7-2: RNA Perceptrón simple

Fuente: (Serrano, y otros, 2010).

Como limitación principal de este modelo se tiene el tipo de datos que es capaz de procesar debido a que si los datos no son lineales el perceptrón no puede determinar un error nulo ya que no puede clasificar los elementos que se encuentren separados unos de otros, para datos lineales tiene una precisión muy aceptable (DIAWEB, 2010).

2.2.4.2. Perceptrón Multicapa

Es el tipo de RNA más utilizado por los usuarios debió a su gran versatilidad y excepcional precisión al momento de calcular valores de salida, su arquitectura contiene una capa de entrada, por lo menos una capa intermedia u oculta y una capa de salida. Utiliza un entrenamiento de propagación hacia atrás que se denomina también de retropropagación (Andrade, 2013 pág. 26).

Las características más fundamentales de este modelo son:

- ❖ La alta eficiencia en modelos no lineales
- ❖ Es muy tolerante ante fallos
- ❖ Puede establecer relaciones entre varios conjuntos de datos

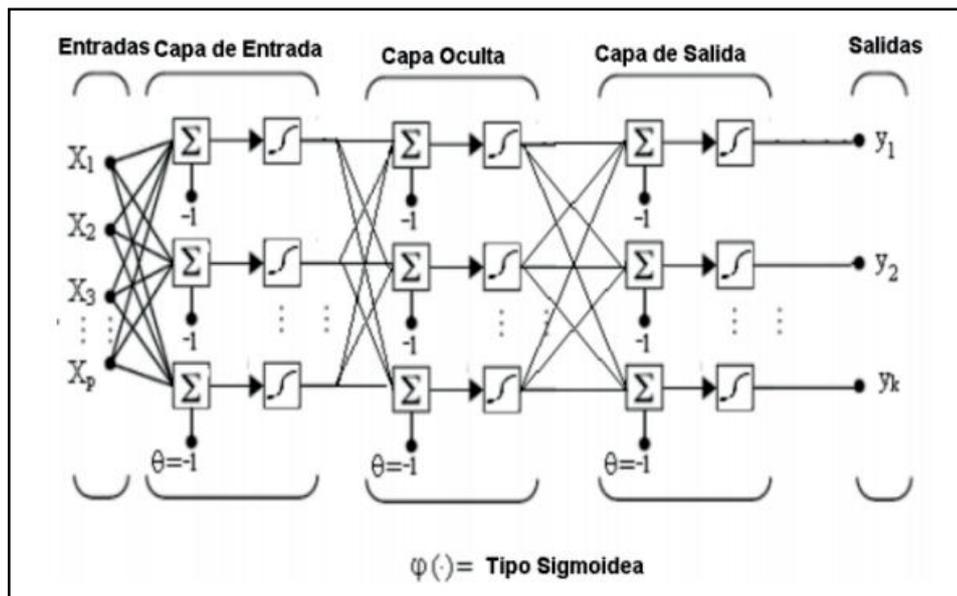


Figura 8-2: RNA Perceptrón multicapa

Fuente: (Andrade, 2013 pág. 27).

En el diagrama del perceptrón multicapa o MultiLayer Perceptrón (MLP) es capaz de poder enviar la señal hacia la salida por medio de los nodos o neuronas mediante la optimización del algoritmo de aprendizaje. En este punto se debe tener en cuenta la cantidad de neuronas y el número de capas que van a conformar la red, en las capas de entrada y de salida se determina la cantidad de neuronas con el número de variables y respuestas que se desea obtener mientras que en las capas ocultas depende solamente del diseñador. Las neuronas realizan la propagación mediante la adición de pesos sinápticos correlacionados entre neuronas, pero el aumento de capas y neuronas genera nuevos inconvenientes de diseño (Andrade, 2013 pág. 27) .

- ❖ **Aumento de la carga computacional.** – Se genera un problema al momento de la implementación de las redes en tiempo real, además aumenta el tiempo de entrenamiento de una sola red.
- ❖ **Perdida de la capacidad de generalización.** – Mientras se aumenta el número de neuronas en la capa oculta se aumenta también la cantidad de pesos sinápticos generando un mayor número de parámetros que ayudan a una más eficiente modelación de los patrones, pero a costa de una pérdida de la capacidad de generalización ya que aumenta la discapacidad de ajuste de un modelo con más parámetros.

2.2.4.3. Red Backpropagation

Muchos años después de la implementación del perceptrón no se obtuvieron resultados significativos en la creación de nuevos algoritmos de entrenamiento directamente en redes multicapa, partiendo de las limitaciones de las redes monocapa la implementación de la

computación neuronal se estancó durante dos décadas hasta que llegó el descubrimiento del algoritmo de retropropagación que devolvió el interés de los investigadores por las redes neuronales artificiales. El método de propagación hacia atrás es un método de entrenamiento de redes multicapa, su mayor ventaja es la capacidad de entrenamiento de las capas ocultas (Bosogain, 2015 pág. 28).

La arquitectura de este modelo se basa en la unidad de procesamiento en donde las entradas suministran la información para ser procesada y esta unidad brinda la información trabajada a la salida, se caracteriza por la realización de una suma ponderada de todas las entradas para presentar una salida con un valor que se correlaciona con el sistema de ajuste de pesos sinápticos, este peso se relaciona con la conexión de la unidad y puede ser modificado en el proceso de entrenamiento. En este modelo usualmente se utiliza tres o más capas con su cantidad individual de neuronas, solo las capas ocultas presentan unidades de procesamiento ya que las capas de entrada y de salida solo reciben o muestran los datos que el diseñador le asigne (Bosogain, 2015 pág. 29).

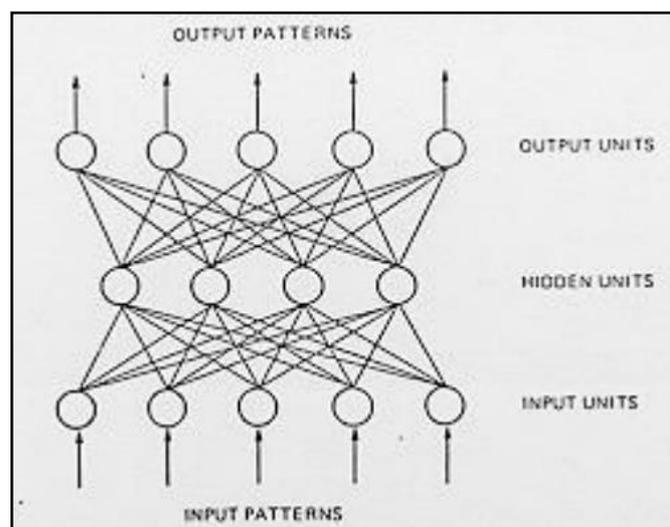


Figura 9-2: RNA de retropropagación

Fuente: (Andrade, 2013 pág. 27).

Este tipo de redes son utilizadas en gran campo de aplicaciones debido a su capacidad de adaptación a varios tipos de datos se aplican a procesos como: síntesis de voz, clasificación de imágenes, procesos de bases de conocimientos, problemáticas de percepción, clasificadores de varios tipos, etc. Las ventajas principales de la red es la capacidad de procesar varios patrones al aprender una gran variedad de correlaciones entre los datos, no se necesita tener un conocimiento extenso de los modelos matemáticos que rigen el proceso de entrada y salida de datos, este modelo solo necesita ejemplos o datos de entrenamiento para funcionar, tiene una gran flexibilidad de diseño ya que se tiene el control del número de capas internas con sus respectivas neuronas o unidades de procesamiento que permite ser aplicable a un sin número de aplicaciones. El único

inconveniente de este modelo es el “tiempo de convergencia” ya que al tener grandes cantidades de datos necesitara un largo tiempo de calculo que provoca que la red pueda no converger nunca, para mejorar esta característica se debe variar los parámetros de aprendizaje al inicio con valores muy altos e ir reduciéndolos progresivamente, que permite reducir los “mínimos locales” (Bosogain, 2015 págs. 33-34).

2.2.5. Entrenamiento de RNAs

El sistema de entrenamiento de las redes neuronales artificiales se basa exclusivamente en ajustar los diversos parámetros libres que existen en cada tipo de red (Evolutionary Artificial Neural Networks, 1995). El sistema de aprendizaje parte de un punto aleatorio de pesos sinápticos y busca definir los valores de pesos que permitan realizar a la red una determinada tarea. Este sistema es interactivo ya que el desarrollador debe alcanzar un sistema de operación lo suficientemente eficiente. Los más usuales métodos de entrenamiento basados en la propagación hacia adelante consiste en proporcionar una función para el error capas de medir el rendimiento de la RNA en correlación con los pesos sinápticos ya que la principal función del entrenamiento es de ajustar los pesos sinápticos hasta minimizar el gradiente de error, encontrando por este medio el punto óptimo de la red neuronal (Bertona, 2005 pág. 15).

2.2.5.1. Método de gradiente descendiente

Este método es el más utilizado para reducir el gradiente de error ya que es capaz de generar una función $E(W)$ que es la encargada de mostrar el error de una red dependiendo de los pesos sinápticos que adopte, el objetivo principal de la función es lograr determinar el conjunto de pesos sinápticos que contenga una red neuronal que determinara el mínimo de la función de error a pesar de que en la práctica es suficiente con encontrar un error aceptable para terminar el entrenamiento (Cauwenberghs, 1993).

El fundamento de este método se basa en que un conjunto de datos representando a los pesos sinápticos $w(0)$ en un instante de tiempo $t = 0$ en donde se determina el valor de la “dirección de máxima variación del error”, esta dirección está en función de los pesos sinápticos y se representa por el gradiente $\nabla E(W)$, después los pesos se actualizan mediante la dirección contraria al indicador dado por el gradiente que representa el decrecimiento del error (De Falco, y otros, 1997).

$$W(t + 1) = W(t) - \alpha \nabla E(W)$$

En la ecuación la variable α representa el “tamaño del paso tomado en cada iteración” que es diferente para cada uno de los pesos sinápticos, este valor se espera que sea infinitesimal debido a

que si se toma un valor demasiado pequeño el entrenamiento se realizara de manera muy lenta, a diferencia de si se toma un valor demasiado alto se puede causar “oscilaciones en torno al punto mínimo” (Bertona, 2005 pág. 15).

2.2.5.2. Algoritmo Backpropagation

El método de retropropagación se establece como el más utilizado en las redes de propagación hacia adelante y consiste en un método de aprendizaje supervisado es decir necesariamente se deben ingresar datos de entrada y entrenamiento, se pueden distinguir dos partes fundamentales de este método, en el primero se aplica un determinado patrón de entrada que fluye por las capas internas de la red hasta terminar en la capa de salida, el valor que se obtenga a la salida es comparado con la salida que se requiera calculando la diferencia existente entre estos dos valores que permiten determinar el grado de error de cada neurona, los valores de los errores son enviados hacia atrás desde la salida de la red y hacia las capas intermedias de la misma (Fritsch, 1996).

Para describir el algoritmo de retropropagación hay que entender que realiza una “actualización iterativa de los pesos sinápticos” (Bertona, 2005 pág. 16).

$$W(t + 1) = W(t) - \alpha \nabla E[W(t)]$$

Al igual las salidas de una neurona i está determinada por su estado de activación, generándose una función de salida identidad (Bertona, 2005 pág. 16).

$$y_i = F_i(a_i(t)) = a_i(t)$$

Determinando la nueva función como:

$$a_i(t) = f_i(h_i(t))$$

En este punto se aplica la regla de propagación más simple y utilizada que “consiste en realizar una suma de las entradas ponderadas con sus pesos sinápticos correspondientes”. Al finalizar se compara las diferentes salidas determinadas Y_p con las que se requieren D_p capas de determinar un error en el entrenamiento (Bertona, 2005 pág. 16).

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} * x_j(t)$$

$$e_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (d_{pk} - y_{pk})^2$$

En esta ecuación se determina una nueva variable denominada k que es la que representa “el índice de neurona para las neuronas de la última capa” con la constante M que representa el número total de neuronas ya llevado a cabo este procedimiento se determina en error total y global de la red neuronal (Bertona, 2005 pág. 17).

$$e = \frac{\sum_{p=1}^P e_p}{P}$$

Los modos de entrenamiento que se registran para este tipo de algoritmo se determinan por la manera en que se actualizan los denominados pesos sinápticos de las neuronas de las capas ocultas de la red y cada uno de estos contiene sus propias desventajas y ventajas.

- ❖ **Modo secuencial.** - En este modo las diferentes actualizaciones de los pesos sinápticos se determinan solo después de la presentación de los ejemplos de entrenamiento, de aquí es que se los conoce también como el método por patrón ya que si un conjunto de entrenamiento tiene N ejemplos las correcciones de los pesos tendrán N modificaciones en cada época (Evolutionary Artificial Neural Networks, 1993).
- ❖ **Modo Batch.** - El entrenamiento que se realiza por este método modifica los pesos sinápticos en una única vez después de terminar el conjunto de entrenamiento ya que al final de cada época de aprendizaje se presenta un valor de error cuadrático medio generado por la RNA (Bertona, 2005 pág. 20).

2.2.6. *Simulador libre DWSIM*

Los grandes simuladores de procesos industriales como Aspen Hysys si bien son muy eficaces, siempre suelen tener un costo que puede no ser tan accesible para empresas pequeñas, universidades y estudiantes. Por esta razón es que el simulador DWSIM es de gran importancia debido a que es un simulador de procesos, de código abierto, descarga libre y gratuita (DWSIM, 2020).

El sitio oficial de DWSIM se encuentra en dwsim.inforside.com.br. En ese sitio se puede descargar un addin de Excel para cálculos termodinámicos. Este addin permite hacer cálculos de propiedades termodinámicas de compuestos puros y de mezclas de una sola fase directamente en Excel, para integrar dentro de otras planillas de cálculo o modelos que se tenga ya implementados. Si bien el software es totalmente gratuito, el sitio oficial incluye un enlace que se puede usar para hacer una donación al autor. DWSIM fue desarrollado originalmente por Daniel Medeiros, un ingeniero de procesos brasileño, en 2006, al que luego se le sumó Gregor Reichert (DWSIM, 2020).

2.2.6.1. *Características*

DWSIM tiene una interfaz gráfica intuitiva y fácil de usar, con muchas de las funciones que encuentras en simuladores comerciales. Permite usar una lista completa de operaciones unitarias, modelos termodinámicos avanzados, soporte para sistemas reactivos, y herramientas de caracterización de crudos (DWSIM, 2020).

Entre las operaciones unitarias incluidas en DWSIM están:

- ❖ Mezclador
- ❖ Separador
- ❖ Splitter
- ❖ Bomba

- ❖ Compresor
- ❖ Expansor
- ❖ Calentador-enfriador
- ❖ Válvulas
- ❖ Segmentos de cañería
- ❖ Columna de destilación (método shortcut)
- ❖ Intercambiador de calor
- ❖ Reactores
- ❖ Placa orificio
- ❖ Columnas de destilación/absorción
- ❖ Separador de sólidos
- ❖ Filtros

Los modelos termodinámicos incluidos son:

- ❖ Peng-Robinson
- ❖ Soave-Redlich-Kwong
- ❖ Lee-Kesler
- ❖ Lee-Kesler-Plöcker
- ❖ NRTL
- ❖ COSMO-SAC
- ❖ LIQUAC
- ❖ PC-SAFT
- ❖ FPROPS
- ❖ CoolProp
- ❖ Chao-Seader
- ❖ Grayson-Streed
- ❖ Ley de Raoult
- ❖ Tablas de vapor IAPWS-IF97
- ❖ Agua marina IAPWS-08
- ❖ UNIFAC, UNIFAC modificado (Dortmund), UNIQUAC y UNIQUAC extendido

DWSIM está programado en conformidad con el estándar CAPE-OPEN que es un estándar de ingeniería de procesos que promueve la interoperabilidad de las soluciones de simulación permitiendo combinar interfaces de componentes de modelamiento de diferentes softwares entre sí. Este estándar fue desarrollado por compañías operadoras, firmas de tecnología, grupos académicos y grandes simuladores comerciales como Aspen Plus o Aspen Hysys también se adhieren a este estándar, DWSIM ha recibido reconocimientos por ser la primera implementación de código abierto del estándar CAPE-OPEN (DWSIM, DWSIM Simulator, 2020). En la tabla 3-2 se puede apreciar las características por plataforma de DWSIM.

Tabla 3-2: Características de DWSIM por plataforma.

	Interfaz de usuario clásica (Windows o Linux)	Interfaz de usuario multiplataforma (Windows, Linux, macOS)	Android, iOS
Modelado Dinámico			
Modelo dinámico	Si	Si	No
Modelos Termodinámicos			
Ley de Raoult (ideal)	Si	Si	Si
Peng-Robinson / Soave-Redlich-Kwong EOS	Si	Si	Si (paquete de modelos EOS)

PC-SAFT EOS	Si	Si	Si (paquete de modelos EOS)
GERG-2008 EOS	Si	Si	Si (paquete de modelos EOS)
Peng-Robinson con entalpía de Lee-Kesler	Si	Si	No
Peng-Robinson-Stryjek-Vera 2 (PRSV2)	Si	Si	No
NRTL	Si	Si	Si (paquete de modelo de coeficiente de actividad)
UNIQUAC	Si	Si	Si (paquete de modelo de coeficiente de actividad)
UNIFAC	Si	Si	No
UNIFAC-LL	Si	Si	No
UNIFAC modificado (Dortmund)	Si	Si	Si (paquete de modelo de coeficiente de actividad)
UNIFAC modificado (NIST)	Si	Si	No
Chao-Seader	Si	Si	Si
Grayson-Streed	Si	Si	No
Lee-Kesler-Plöcker	Si	Si	Si
CoolProp	Si	Si	Si
Mesas de vapor IAPWS-IF97	Si	Si	Si
IAPWS-08 Agua de mar	Si	Si	No
Agua Amarga	Si	Si	No
Aceite negro	Si	Si	No
Zócalo CAPE-OPEN	Si (solo para Windows y Linux)	Si (solo para Windows y Linux)	No
Operaciones unitarias y modelos de bloques lógicos			
Mezclador / Divisor	Si	Si	Si
Bomba / Válvula / Calentador / Enfriador	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 1)
Compresor	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 2)
Expansor	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 2)
Intercambiador de calor	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 2)
Separador de gas-líquido	Si	Si	Si
Columna de destilación de acceso directo	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 2)
Columna de destilación rigurosa	Si	Si	Si
Columna de absorción rigurosa	Si	Si	Si

Separador compuesto	Si	Si	Si
Segmento de tubería	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 3)
Placa de orificio	Si	Si	No
Reactor de conversión	Si	Si	Si (Paquete de modelado de reactores)
Reactor de equilibrio	Si	Si	Si (Paquete de modelado de reactores)
Reactor de Gibbs	Si	Si	Si (Paquete de modelado de reactores)
PFR	Si	Si	Si (Paquete de modelado de reactores)
CSTR	Si	Si	Si (Paquete de modelado de reactores)
Tanque	Si	Si	No
Separador de sólidos	Si	Si	Sí
Filtro de sólidos	Si	Si	No
Reciclar bloque	Si	Si	Sí
Bloque de reciclaje de energía	Si	Si	No
Ajustar bloque	Si	Si	Si (Paquete de operaciones unitarias 3)
Bloque de especificación	Si	Si	No
Operación de la unidad CAPE-OPEN	Si	Si	No
Operación de la unidad de hoja de cálculo	Si	Si	No
Operación de la unidad de secuencia de comandos de Python	Si	Si	No
Operación de la unidad de diagrama de flujo	Si	Si	No
Herramientas de diagrama de flujo			
Gerente de reacciones	Si	Si	Si
Gerente de Ensayos de Petróleo	Si	No	No
Caracterización a granel de fracciones de petróleo	Si	Si	Si
Caracterización de la destilación de fracciones de petróleo	Si	Si	Si
Análisis paramétrico			
Análisis de sensibilidad	Si	Si	Si
Optimización de la hoja de flujo	Si	Si	Si
Utilidades de la hoja de flujo			
Verdadero punto crítico (EOS)	Si	Si	Sí (paquete de utilidades de diagrama de flujo)

Sobres de fase	Si	Si	Sí (paquete de utilidades de diagrama de flujo)
Sobres binarios	Si	Si	Sí (paquete de utilidades de diagrama de flujo)
Sobres ternarios	Si	No	No
Propiedades de flujo en frío del petróleo	Si	No	No
Hidratos de gas natural	Si	No	No
Dimensionamiento del separador gas-líquido	Si	Si	Si
Dimensionamiento de la válvula (PSV)	Si	No	No
Dimensionamiento de la válvula (proceso)	Si	Si	Si
Informe de resultados			
Exportar a PDF	Si	Si	Si
Exportar a texto	Si	No	Si
Exportar a ODS / ODT	Si	Si	No
Manipulación de datos			
Guardar / cargar datos del diagrama de flujo	Si	Si	Si
Importación de datos compuestos	Si	Si	Si
Exportación de datos compuestos	Si	Si	Si
Importación / exportación de datos de parámetros de interacción	Si	Si	No
Diverso			
Secuencias de comandos de Python	Si	Si	No
Creador de compuestos	Si	Si	Sí (paquete de creador de compuestos)
Regresión de datos de VLE experimental	Si	No	No
Utilidad de evaluación comparativa del rendimiento del sistema	No	No	Si

Fuente: (DWSIM, 2020)

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022

2.3. Marco Legal

2.3.1. Software Libre en Ecuador

En el país se ha determinado una política tecnológica que pone especial énfasis en los modelos de Software Libre debido a que “el código abierto, las licencias de uso libre, el uso de estándares abiertos y el trabajo comunitario, facilitan la inclusión digital, la soberanía tecnológica y la innovación local, optimizando el gasto estatal, favoreciendo el desarrollo local y promoviendo la integración regional” (Ministerio de telecomunicaciones y de la sociedad de la información, 2020).

2.3.1.1. Código Orgánico de Economía Social

En este código se explica acerca de los diferentes parámetros y sectores que rigen a las actividades que tienen como objetivo la búsqueda de nuevos conocimientos por medio de las destrezas plenamente de desarrollo creativo y creación de nuevas tecnologías de innovación, particularmente en el segundo apartado del código se explica sobre las tecnologías libres y los formatos abiertos que estas tienen.

- ❖ **Artículo 142.** – Este artículo explica las tecnologías libres o lo que es lo mismo los softwares de código abierto con estándares libres y hardware gratuito. En donde se pone especial atención a las libertades que los softwares libres brindan a los usuarios como: “La libertad de ejecutar el software para cualquier propósito, la libertad de estudiar cómo funciona el software y modificarlo para adaptarlo a cualquier necesidad y el acceso al código fuente es una condición imprescindible para ello, la libertad de redistribuir copias y la libertad de distribuir copias de sus versiones modificadas a terceros (Ministerio de telecomunicaciones y de la sociedad de la información, 2020).
- ❖ **Artículo 145.** – Aquí se trata sobre la “migración de software de fuente abierta” que permite a las organizaciones públicas o privadas transferir sus bancos de datos a nuevas tecnologías libres, para esto se considera las siguientes características del software evaluado: “sostenibilidad de la solución, costo de oportunidad y estándares de seguridad” (Ministerio de telecomunicaciones y de la sociedad de la información, 2020).
- ❖ **Artículo 151.** – En este artículo se explica la libre elección de software en componentes electrónicos que permitan tener más de un sistema operativo como son los dispositivos móviles y las computadoras ya que los proveedores de estos equipos están obligados a brindar alternativas de softwares a sus clientes (Ministerio de telecomunicaciones y de la sociedad de la información, 2020).

2.3.1.2. Decreto Ejecutivo No. 1014

En este decreto se explica acerca de las estrategias que contribuyen a la implementación de los softwares libres en las administraciones públicas centrales.

- ❖ **Artículo 1.** – Se establecen las políticas públicas para las “Entidades de la Administración Pública Central” que permite la utilización de los denominados softwares libres en sus equipamientos y sistemas informáticos (Machado, 2008).
- ❖ **Artículo 4.** – Se establece el acceso a la utilización de softwares privados solo en el caso de que no se llegue a una posible solución con algún determinado software libre que permita satisfacer las tareas que se quieran realizar, además se permite en el caso de que exista algún

riesgo a la seguridad nacional y si el modelo informático se posiciona en un sector de no retorno (Machado, 2008).

- ❖ **Artículo 5.** – Los softwares libres y privados deben poder cumplir con los requerimientos en el siguiente orden: “nacionales que permitan autonomía y soberanía tecnológica, regionales con componente nacional, regionales con proveedores nacionales, internacional con componente nacional, internacionales con proveedores nacionales, internacionales (Machado, 2008).
- ❖ **Artículo 6.** – La entidad encargada del control y previo seguimiento de este decreto son las extensiones del gobierno central por medio del órgano regulador de la “Subsecretaría de Informática” (Machado, 2008).

2.3.1.3. Plan Nacional de Gobierno Electrónico (PNGE)

Las determinaciones del plan nacional es la atención de las necesidades de las personas mediante la creación de un gobierno electrónico, generando una estrategia de relación de confianza entre el gobierno y los ciudadanos. Busca promover la participación de la ciudadanía mediante la facilitación de los diferentes tramites y control de actividades mediante la creación de nuevos servicios en línea (Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad, 2018).

Programas	 Gobierno abierto	 Gobierno cercano	 Gobierno eficaz y eficiente
Objetivos	Incrementar la participación y co-creación ciudadana por medios electrónicos para el desarrollo de política pública, mejorar de los servicios del Estado y fomentar la transparencia.	Incrementar el uso de servicios electrónicos del Gobierno Central para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.	Incrementar el uso eficiente de los recursos estatales para la entrega de servicios a la ciudadanía.
Estrategias	<ul style="list-style-type: none">  Potenciar participación electrónica.  Promover uso datos abiertos.  Impulsar protección de datos personales. 	<ul style="list-style-type: none">  Homogeneizar presencia web gubernamental.  Aumentar presencia móvil gubernamental.  Servicios electrónicos para grupos de atención prioritaria.  Robustecer Ciberseguridad.  Mejorar la calidad de los servicios electrónicos. 	<ul style="list-style-type: none">  Aumentar uso nube y red gubernamental.  Impulsar reutilización del software Estatal.  Implementar Inventario tecnológico y de conocimiento.  Incrementar la digitalización de oficinas públicas.  Impulsar decisiones con datos digitales.  Incrementar interoperabilidad con gobiernos autónomos.

Figura 10-2: Programas, objetivos y estrategias del PNGE

Fuente: (Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad, 2018).

2.3.2. Software Libre de DWSIM

El sistema de simulación de procesos químicos de DWSIM utiliza un código abierto o libre que es capaz de cumplir con las especificaciones de CAPE-OPEN tanto para Linux como para Windows, está construido en las partes superiores de las diferentes plataformas de “Microsoft .NET 4.0 y Mono” que contiene una interfaz de usuario muy fácil de utilizar permitiendo a los ingenieros químicos o estudiantes de esta ingeniería recrear y controlar procesos químicos de manera directa (ProgSoft, 2020).

Se reconoce al estándar CAPE-OPEN como un conjunto de especificaciones que son capaces de extender el alcance de las aplicaciones en simulación de procesos, también define el conjunto de interfaces y la interoperabilidad denominada “plug and play” que estas pueden tener en un software determinado (CAPE-OPEN: Experiencias de un esfuerzo de estandarización en industrias químicas, 1999).

El programa DWSIM funciona gracias a la licencia publica general (GNU) que permite el “copyleft” de cualquier tipo de trabajo o software que este bajo esta licencia, ya que esta licencia tiene como objetivo general el permitir y garantizar la libertad de cambiar y compartir las funciones y características de un programa mediante el aseguramiento de compartir software gratuito a los usuarios (GNU, 2007).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Etapas de la metodología

Con un criterio analítico dispuesto por la intensa búsqueda bibliográfica sobre los temas de relevancia del presente trabajo de titulación se divide la metodología en las siguientes etapas:

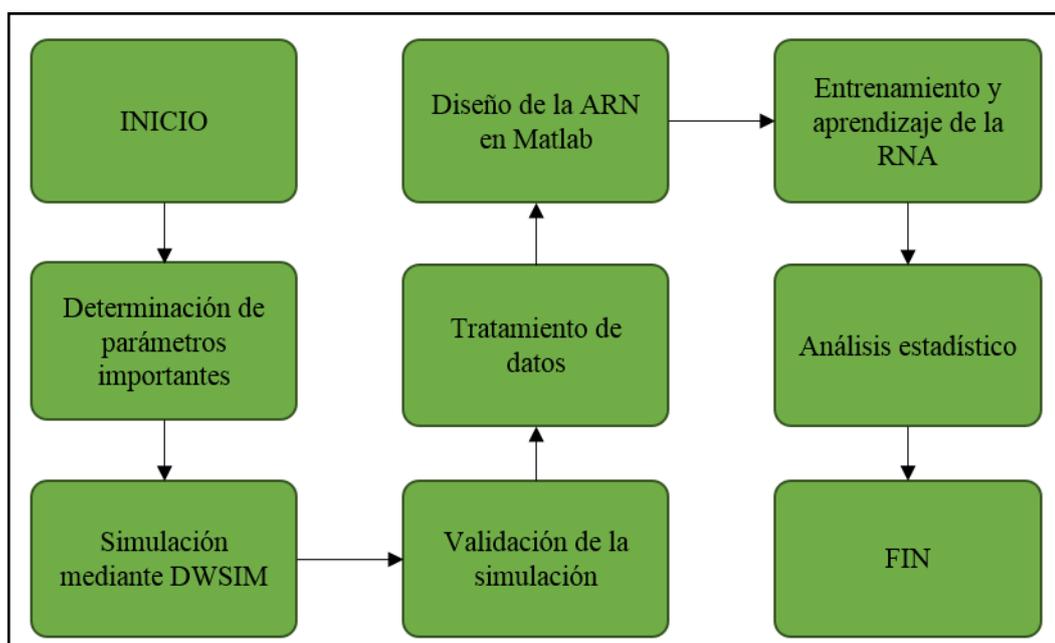


Gráfico 1-3: Metodología del trabajo de titulación

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

El presente trabajo de titulación busca brindar una nueva herramienta tecnológica a la aplicación de control de procesos debido a que se propone una Red Neuronal Artificial para los procesos que ocurren en una columna de fraccionamiento de petróleo esta red es capaz de calcular y predecir los posibles cambios que se den en las características de los productos si se cambia la conformación y arquitectura de la columna de destilación, esta investigación es de carácter cuantitativo ya que para la creación y entrenamiento de la RNA es necesario contar con un banco de datos que se obtiene de la simulación en el programa de software libre DWSIM.

Además, se realiza un extenso análisis estadístico de los resultados obtenidos de la RNA en comparación con los datos obtenidos en la simulación ya que este análisis es utilizado como una técnica de validación e interpretación que permite medir la correlación de las desviaciones de valores predichos con los valores simulados calculándose un valor de error y permitiendo obtener un grado de confiabilidad en los resultados.

Las fuentes principales para el diseño y desarrollo de este proyecto provienen de:

Fuente Primaria:

- ❖ Datos y experiencias obtenidas por el autor mediante técnicas experimentales en simulación de procesos en el programa DWSIM y el procesamiento de datos mediante la utilización de Matlab y Excel.

Fuente Secundaria:

- ❖ Libros físicos y digitales de contenidos afines al tema.
- ❖ Artículos científicos de medio y alto impacto correlacionados al tema y publicados en revistas científicas indexadas.
- ❖ Tesis de maestrías y doctorados publicadas por universidades nacionales e internacionales.
- ❖ Páginas webs oficiales de los diferentes softwares aplicados en el presente trabajo de titulación.

3.2. Determinación de parámetros importantes

Para esta aplicación tecnología se toma como base de información para la realización de la simulación en DWSIM el artículo científico publicado por la revista “Cleaner Production” titulado como “*Exceeding Pinch limits by process configuration of an existing modern crude oil distillation unit e A case study from refining industry*” que fue propuesto por: Omar S. Bayomie del departamento de Energía y Procesos de la Universidad de Investigación PSL de Paris y del departamento de química de la Universidad Americana en el Cairo, Egipto; Omar Y. Abdelaziz miembro de los departamentos de Ingeniería Química de las Universidades del Cairo-Egipto, Lund-Suecia y Mamdouh A. Gadalla miembro de los departamentos de Ingeniería Química de las Universidades “Port Said University y The British University in Eryp” de Egipto.

3.2.1. Descripción del proceso

La columna de destilación que se estudió en este proyecto se encuentra ubicada en Egipto y cuenta con una gran sección de intercambiadores de calor que le permiten adquirir gran eficiencia energética, ya que el crudo es ingresado mediante una bomba en la sección de relleno que contiene una primera columna de destilación de tipo “pre-flash” que contiene 20 platos en su estructura, la alimentación de esta torre es precalentada a 213 °C por medio de la sección de intercambiadores de calor ya en esta temperatura se ingresa a la columna C-1 en el plato 16, los vapores son condensados en la parte superior a temperaturas de 110 °C a 40 °C, el líquido resultante es enviado a la salida de nafta ligera y al sistema de reflujo de la C-1 (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1051).

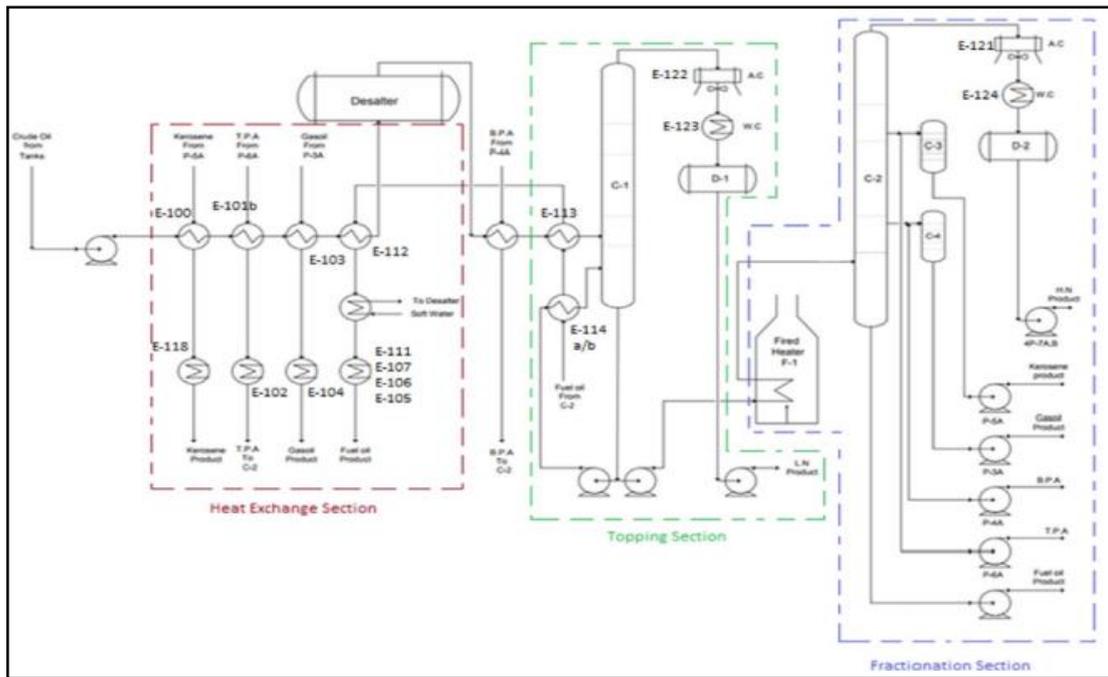


Figura 1-3: Diagrama de flujo de proceso

Fuente: (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1051).

En la sección de fraccionamiento principal que se puede apreciar en la figura 1-3 se tienen un horno para mantener la alimentación a elevadas temperaturas, pasando a una segunda columna de destilación que contiene 32 platos en su estructura que desemboca en varias salidas de combustibles potenciadas por bombas, los productos que se recuperan en esta fase del proceso son: gasóleo, queroseno, naftas pesadas y livianas. El crudo alimentado se mantienen en el intervalo de temperatura de 230 °C a 360 °C el horno en donde se da este calentamiento consume 37,16 MW de energía, el crudo es alimentado a la C-2 en la quinta bandeja, el queroseno es extraído en los platos 21 a 23 que sirve de alimentación para un separador de queroseno denominado C-3 ubicado al lateral de la columna principal, el reflujo que se extrae desde la misma línea de salida del queroseno es realimentada a la columna C-2 en los platos 22 y 24, se extrae el gasóleo en los platos 9 a 11 que alimentan el separador lateral de gasóleo C-4, el reflujo de la base que se extrae de la columna C-2 es enviado a la sección de los intercambiadores de calor y es devuelta a la torre solo por encima del plato número 12 (Bayomie, y otros, 2019 págs. 1051-1052).

En la sección de intercambiadores de calor se utiliza la energía contenida en las líneas de queroseno, gasóleo y fueloil para poder precalentar el crudo de alimentación de las dos columnas de fraccionamiento, así como también se utiliza el calor que brindan los reflujos en los procesos intermedios para calentar el crudo antes de que entre al proceso de desalado y calentado, se utiliza también el calor absorbido por el fuel oil para calentar el fondo de la columna de pre-flash y obtener una más eficiente separación, esta sección se divide en tres partes la de precalentamiento

de crudo antes del proceso de desalado, precalentamiento de crudo antes de la columna de pre-flash y el rehervido de los fondos de pre-flash (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1052).

- ❖ **Precalentamiento del crudo antes de desalar.** – El crudo es precalentado en contraflujo por la línea de queroseno en el intercambiador E-100, la línea de bombeo superior aporta calor en contraflujo por los intercambiadores E-101, E-103, E-105, E-106 y el E-107 la temperatura final del crudo precalentado llega a 139 °C, las líneas de queroseno, gasóleo y fueloil se mantienen en 55, 110 y 138 °C respectivamente.
- ❖ **Precalentar el crudo antes de la columna de pre-flash.** – En este punto el crudo llega a la temperatura de 213 °C mediante el bombeo en contra flujo de fueloil en los intercambiadores E-109, E-111, E-112 y E-113.
- ❖ **Rehervido del fondo de pre-flash.** – El material resultante en el fondo de la columna de fraccionamiento C-1 se vuelve a calentar con la línea de fueloil proveniente de la columna de destilación C-2 mediante los intercambiadores E-114a y E-114b.

En la tabla 1-3 se puede apreciar todos los valores del sistema completo de intercambiadores de calor que proporcionan una alta eficiencia energética al proceso de fraccionamiento de crudo.

Tabla 1-3: Datos del sistema de intercambiadores de calor

Intercambiador de calor	Corriente fría	Temperatura de entrada °C	Temperatura de salida °C	Corriente caliente	Temperatura de entrada °C	Temperatura de salida °C	Área (m2)	Energía (MW)
E-100	Crudo antes de 1	25	41	Queroseno 1	146	55	235	2,4
E-102	Crudo antes de 2	41	59	Flujo superior 1	126,7	82,2	235	3,8
E-101b	Crudo antes de 3	59	81	Flujo superior 2	176	126,7	235	3,6
E-103	Crudo antes de 4	81	103	Gasoil	226	110	235	3,7
E-108	Crudo después de 1	139	146	Flujo inferior 1	162,2	149	274	1,5
E-109	Crudo después de 2	146	154	Flujo inferior 2	196	162,2	274	1,9
E-110	Crudo después de 3	154	176,8	Flujo inferior 3	254	196	274	4,3
E-105	Crudo antes de 5	103	117,2	Fueloil 8	155	137,78	235	2,8
E-106	Crudo antes de 6	117,2	126,6	Fueloil 7	175	155	235	1,6
E-107	Crudo antes de 7	126,6	139	Fueloil 6	199	175	235	2,3
E-111	Crudo después de 4	176,8	185	Fueloil 5	215,5	199	274	2,2
E-112	Crudo después de 5	185	200,5	Fueloil 4	240,5	215,5	274	3,2
E-113	Crudo después de 6	200,5	213	Fueloil 3	265,5	240,5	274	2,8
E-114a	Fondo de C-1	232	244	Fueloil 2	285	265,5	274	3
E-114b	Fondo 2 de C-1	244	260	Fueloil 1	312	285	274	2,9
F-1	Crudo precalentado	230	360	Horno				37,2
E-118	Agua de enfriamiento 1	30	37	Queroseno 2	54	40	69	0,4
E-104	Agua de enfriamiento 2	30	37	Gasoil 2	82	54	162	1,6
E-117	Agua de enfriamiento 3	30	37	Fueloil 9	125	100	150	1,1
E-119	Agua de enfriamiento 4	30	37	Fueloil 10	100	76	143	2,1
E-123	Agua de enfriamiento 5	30	40	Nafta ligera	60	40	228	1,9
E-124	Agua de enfriamiento 6	30	40	Nafta pesada	60	40	228	2,7
E-122	Aire de enfriamiento 1	33	35	Nafta ligera	110	60		4,8

Fuente: (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1053).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

3.2.2. Método de prueba ASTM D86

Es el método de prueba estándar para destilación de productos petrolíferos y combustibles líquidos a presión atmosférica, la característica principal de esta destilación es brindar los puntos de ebullición de una mezcla de sustancias petrolíferas debido que al conocer las diferentes temperaturas de ebullición se puede determinar la composición, el comportamiento y las propiedades de los combustibles extraídos para su utilización, esto se realiza al determinar la volatilidad de la mezcla de hidrocarburos que producen gases explosivos por tanto es de suma importancia para determinar la calidad de las gasolinas para automóviles y aviones debido a que estos combustibles pueden afectar el desempeño de los motores de combustión interna en estos dispositivos (ASTM INTERNATIONAL, 2018).

Tabla 2-3: Datos del método ASTM D86

Porcentaje de volumen líquido (%)	Nafta Ligera (°C)	Nafta Pesada (°C)	Queroseno (°C)	Gasoil (°C)
PIE	45	99	162	257
10	48	106	169	266
30	57	118	186	281
50	64	126	204	291
70	73	135	220	304
90	89	149	237	323
PFE	104	160	254	345

Fuente: (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1054).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

3.2.3. Destilación TBP en el proceso

La destilación “*True Boiling Point*” tiene como objetivo el conocer de manera aproximada la composición del crudo debido a que se miden los diferentes puntos de ebullición del conjunto de componentes que contienen el crudo que se está analizando. A este modo de destilación se lo detalla en el método ASTM D2892 que es un proceso de laboratorio que analiza el crudo en los platos teóricos del 15 al 18 manteniendo una relación de flujo 5 a 1, se debe aplicar este método en el crudo ya estabilizado con una concentración baja de butanos pero se puede aplicar a cualquier mezcla de sustancias petrolíferas sin tomar en cuenta los diferentes GLPs de petróleo, naftas sumamente ligeras y sustancias que mantengan puntos de ebullición más altas de los 400 °C y la carga puede estar entre 0,5 y 30 litros que permite la recogida de gases licuados, varios cortes de destilación y residuos, con este método se determina el rendimiento ya sea en peso y volumen, facilita también la trazabilidad de la curva de fraccionamiento que define la temperatura en correspondencia con el porcentaje en peso o volumen recolectado (Benavides, 2017 pág. 6).

Tabla 3-3: Destilación TBP de la mezcla de crudo

Porcentaje de masa líquida (%)	Temperatura (°C)
8	100
12	125
16	150
20	175
24	200
28	225
30	250
35	275
40	300
49	355
57	400
67	455
77	510

Fuente: (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1054).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

3.2.4. Propiedades termodinámicas

Ya teniendo, determinando las características específicas de las diferentes composiciones del crudo que va a ser alimentado al sistema de fraccionamiento se debe tomar en cuenta los caudales que están circulando por el sistema que permite determinar las características termodinámicas de las sustancias que se transmiten por las diferentes líneas.

Uno de los datos requerido necesariamente para los procesos de simulación son las propiedades termodinámicas que rigen a las sustancias y los equipos en donde se realiza el proceso que se desea recrear artificialmente, entonces para el actual proyecto se toma en cuenta los datos termodinámicos brindados por (Bayomie, y otros, 2019) en su artículo científico que simula un sistema de fraccionamiento de crudo en el cual detallan las temperaturas, entalpías, caudales y los calores específicos de todas las líneas de alimentación y salida de todo el sistema analizado.

El modelo y paquete termodinámico Peng Robinson (PR) es el más adecuado para la simulación de hidrocarburos orgánicos (Yela, 2009 pág. 77).

Tabla 4-3: Datos de las corrientes del proceso

Nombre de la corriente	Tipo	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Cp. (Kj/Kg*°C)	Tasa de flujo (Kg/h)	Tasa de Entalpia (MW)
Queroseno	Caliente	146	40	2,303	40950	2,7765
Flujo superior	Caliente	176,7	82,2	2,461	113578	7,3371
Gasóleo	Caliente	226	60	2,48	46165	5,2788
Flujo inferior	Caliente	254,4	149	2,648	99879	7,7438
FO	Caliente	312,8	80	2,358	156963	23,93
Crudo antes del desalador	Fría	25	139	2,174	291667	20,083
Crudo después del desalador	Fría	139	213	2,669	291667	16,003
Fondo de C-1	Fría	232	260	2,813	267703	5,8576
Crudo de cabeza	Fría	230	360	3,844	267703	37,16
Nafta ligera (Reflujo+Producto)	Caliente	110	40	6,627	52690	6,7893
Nafta pesada (Reflujo+Producto)	Caliente	130	40	8,268	59376	12,273

Fuente: (Bayomie, y otros, 2019 pág. 1054).

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

3.3. Simulación mediante DWSIM

Para proceder con la simulación se debe descargar e instalar el simulador con la última versión disponible en la página oficial de DWSIM, al abrir el simulador se presentarán varias opciones de inicio seleccionando la opción de Process Modeling para entrar a la sección de modelo inicial.

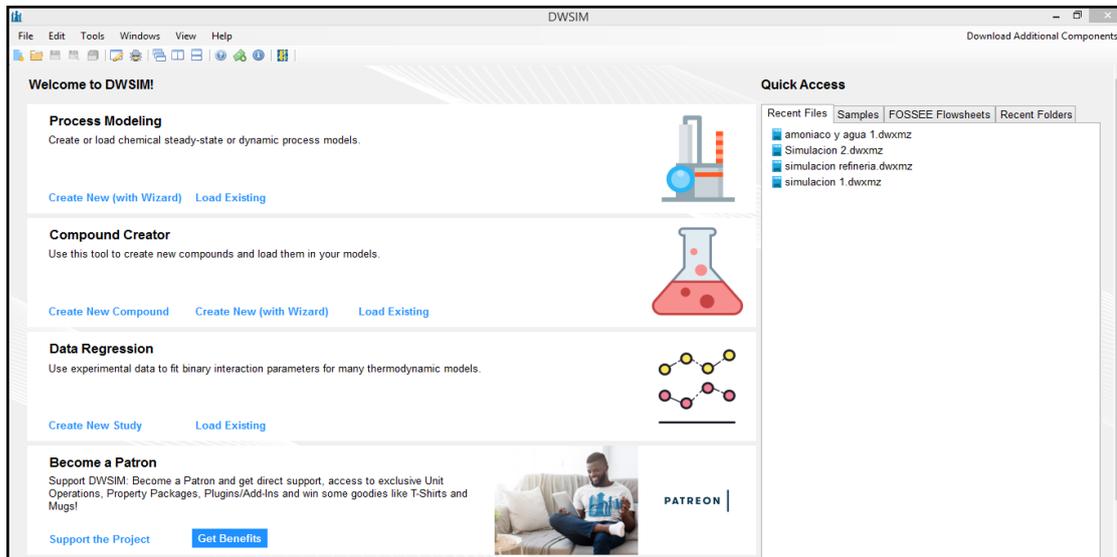


Figura 2-3: Pestaña de inicio de DWSIM

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Pasado este punto se pedirá que se seleccione los componentes que estarán presentes en todo el proceso a simular tomando solamente los compuestos de agua y sal presentes en la librería del propio software, como paquetes termodinámicos se seleccionó en primer lugar el de Peng Robinson (PR) debido a que es el más recomendable para procesos en los que intervienen varios compuestos orgánicos, el paquete de Roul't's Law y el NRTL como auxiliares. Para el Sistema de Unidades se seleccionan las unidades del sistema internacional que están seleccionadas por defecto.

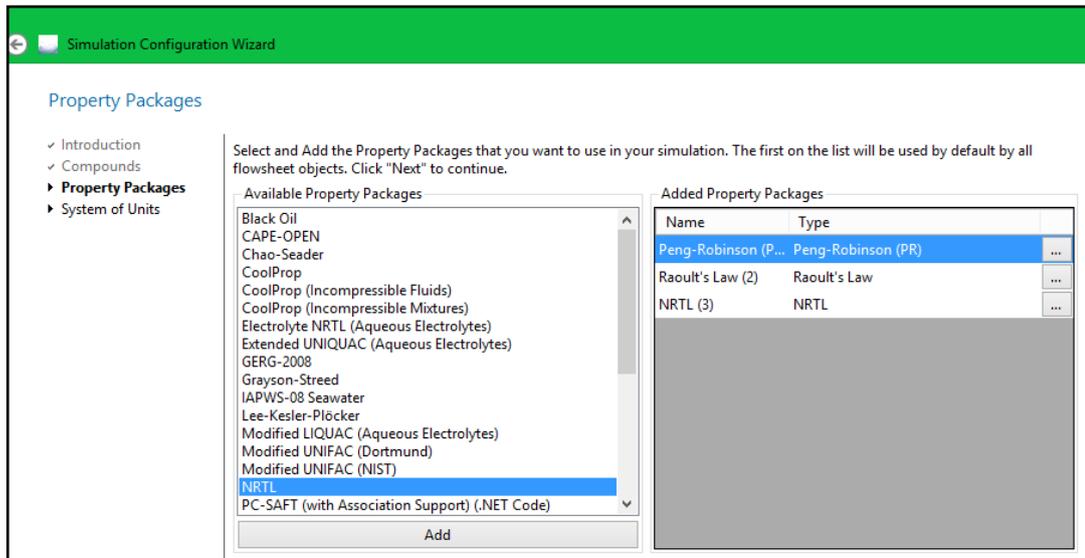


Figura 3-3: Selección de paquetes termodinámicos

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

La composición del crudo se debe ingresar mediante las herramientas que DWSIM dispone debido a que el crudo se caracteriza por contener varios componentes en su estructura imposible de ingresarlos de forma individual. Para este fin se debe hay que dirigirse a la pestaña Tools en donde se despliegan varias opciones, en donde se debe seleccionar la herramienta denominada Petroleum Characterization (Distillation Curves) que sirve para poder caracterizar el crudo mediante las curvas de destilación ya establecidas. Se desplegará una nueva pestaña en donde se puede elegir las características de las curvas de destilación que van a ser analizadas. Se selecciona la curva TBP de los puntos de ebullición que rigen a la técnica de caracterización denominada ASTM D2892, como curva básica de masa sin modificar los valores que se añaden por defecto. A continuación, se deben ingresar los datos experimentales en este punto se ingresan los datos que se exponen en la tabla 3-3 hay que tener cuidado con las unidades que se ingresaran ya que pueden ser diferentes. Se presentarán las gráficas de las curvas de destilación y se deberá elegir el número de pseudocomponentes que compondrán a la alimentación de crudo siendo seleccionado 7 pseudocomponentes.

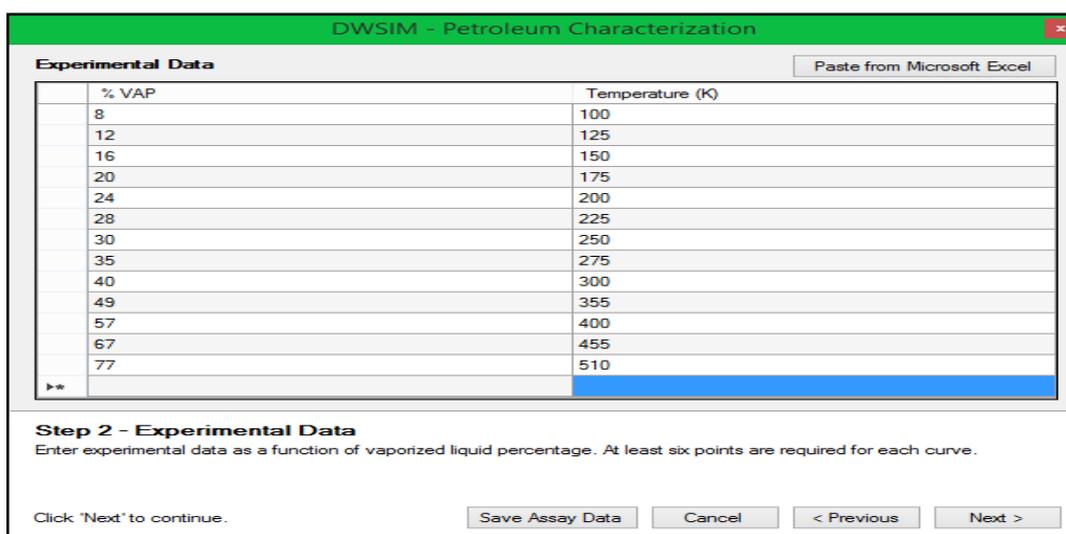


Figura 4-3: Ingreso de datos de la curva de destilación TBP

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para elegir los métodos y correlaciones de cálculos de los pseudocomponentes se debe configurar dependiendo de las características de los compuestos a ser evaluados y en este caso se utilizó para la temperatura y la presión crítica el modelo de Riazi-Daubert (1985), para el factor acéntrico el de Korsten (2000), para cálculos de gravedad específica con Riazi-Al-Sahhanf (1996), el peso molecular es calculado mediante el modelo Winn (1956) y la viscosidad cinética por medio del modelo de Abbott (1971).

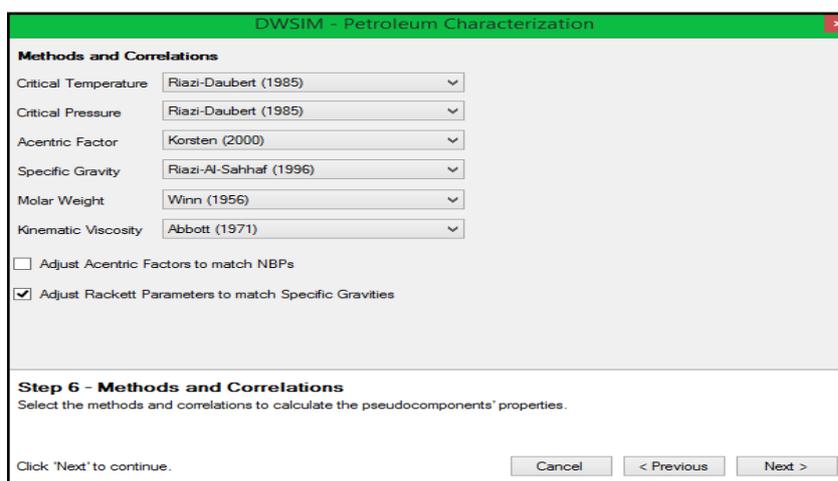


Figura 5-3: Ingreso de los métodos y correlaciones

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para finalizar se muestran los resultados y las características fisicoquímicas de cada pseudocomponente y permite dar una revisión de todos los valores correspondientes a la caracterización del crudo dando como resultado el punto normal de ebullición en 532,09 °C.

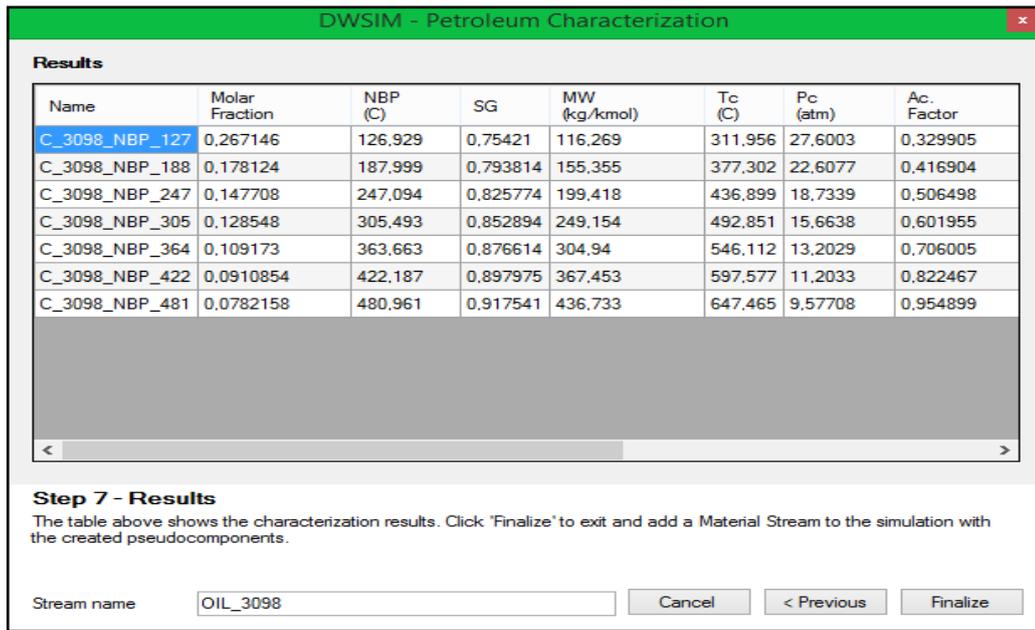


Figura 6-3: Propiedades de los pseudocomponentes creados
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Una vez ya creada la alimentación que corresponde al crudo caracterizado se puede comenzar con la ubicación de los equipos que van a constituir el sistema de fraccionamiento completo con sus debidas corrientes de alimentación y salida.

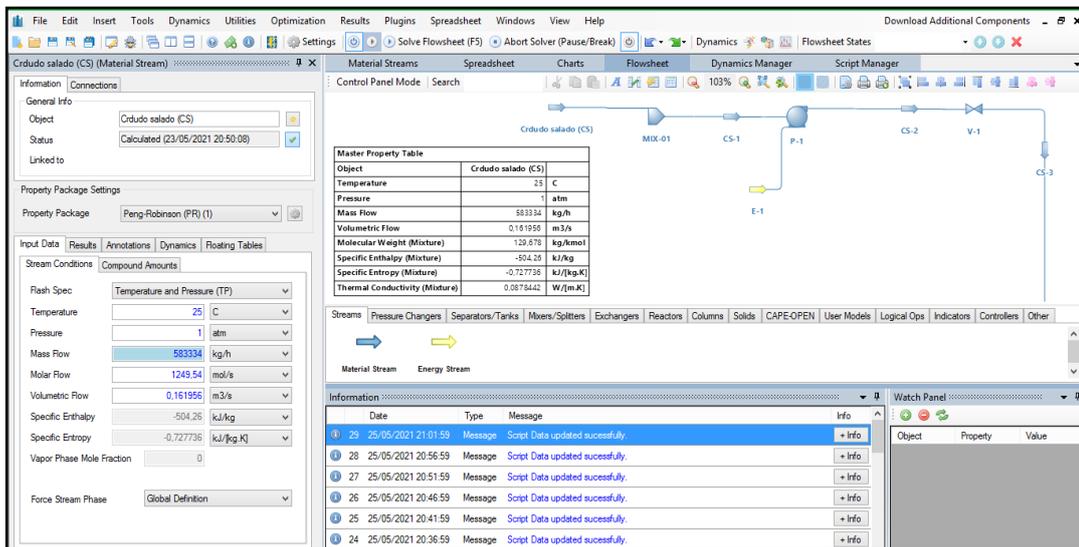


Figura 7-3: Especificaciones de la entrada de crudo
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para el diseño del sistema de intercambiadores de calor se debe ingresar los datos ya establecidos en las tablas 1-3 y 4-3 donde se muestran las condiciones en las cuales deben operar como: las temperaturas, el área de transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor entre otras

hay que tener en cuenta que todos estos equipos están funcionando bajo el paquete termodinámico PR.

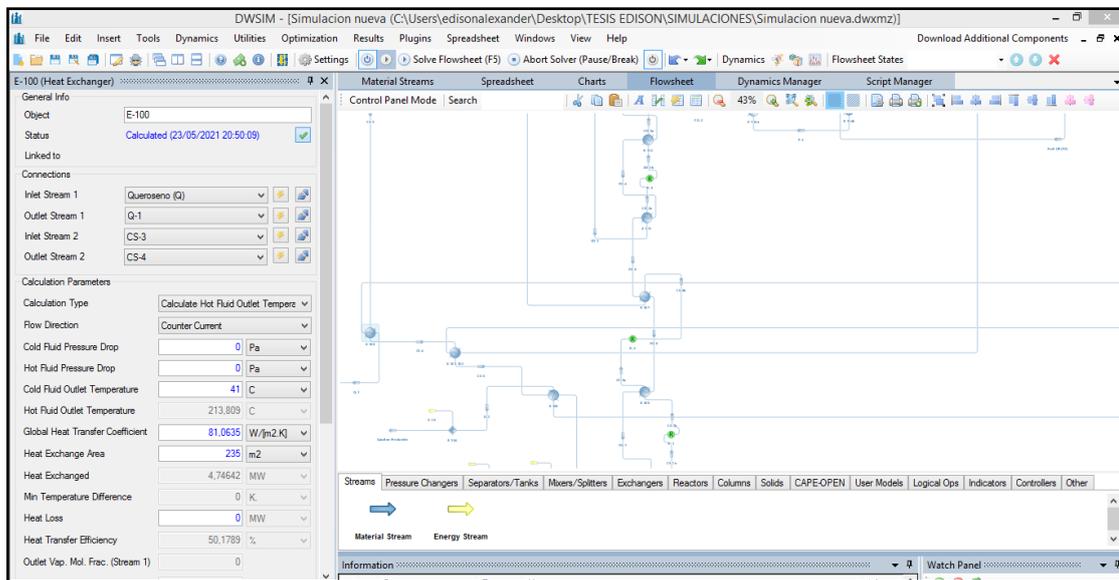


Figura 8-3: Sección de intercambiadores de calor
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para la primera torre de fraccionamiento denominada C-1 se utiliza la característica de DWSIM de ser un software de función Cape-Open que le permite vincularse con ChemSep que es programa específico para simular torres de destilación, en donde se ingresan automáticamente las conexiones de entrada y salida. Ya en la pestaña de ChemSep se presentan varios lineamientos que se ingresan como un título y los componentes que servirá para los cálculos de las características de la torre de fraccionamiento. El punto más importante del diseño de la torre de destilación es la determinación de las operaciones que realizara la torre, se establece una columna de equilibrio con una destilación de tipo extractiva, en donde se realiza una condensación total y un reflujo parcial del producto destilado en estado líquido, con un número total de 20 platos o bandejas en su estructura, con dos alimentaciones una en el plato 16 y otra en el palto 18, además de los productos que se obtiene en la columna se extrae del plato 8 y del plato 14 dos flujo que sirven de alimentación a la segunda torre de fraccionamiento, la primera salida en el plato 8 es la de naftas ligeras con un flujo de 0,06 Kg/s y la segunda del plato 14 que alimentara la C-2 un flujo de 0,38235 Kg/s. Todo el proceso de destilación se lo realiza a presión atmosférica. En las especificaciones de la columna más concretamente en el condensador se ingresa un radio reflujo de 2 y una fracción de combinación de 0,5 en el recalentador o fondo de la columna.

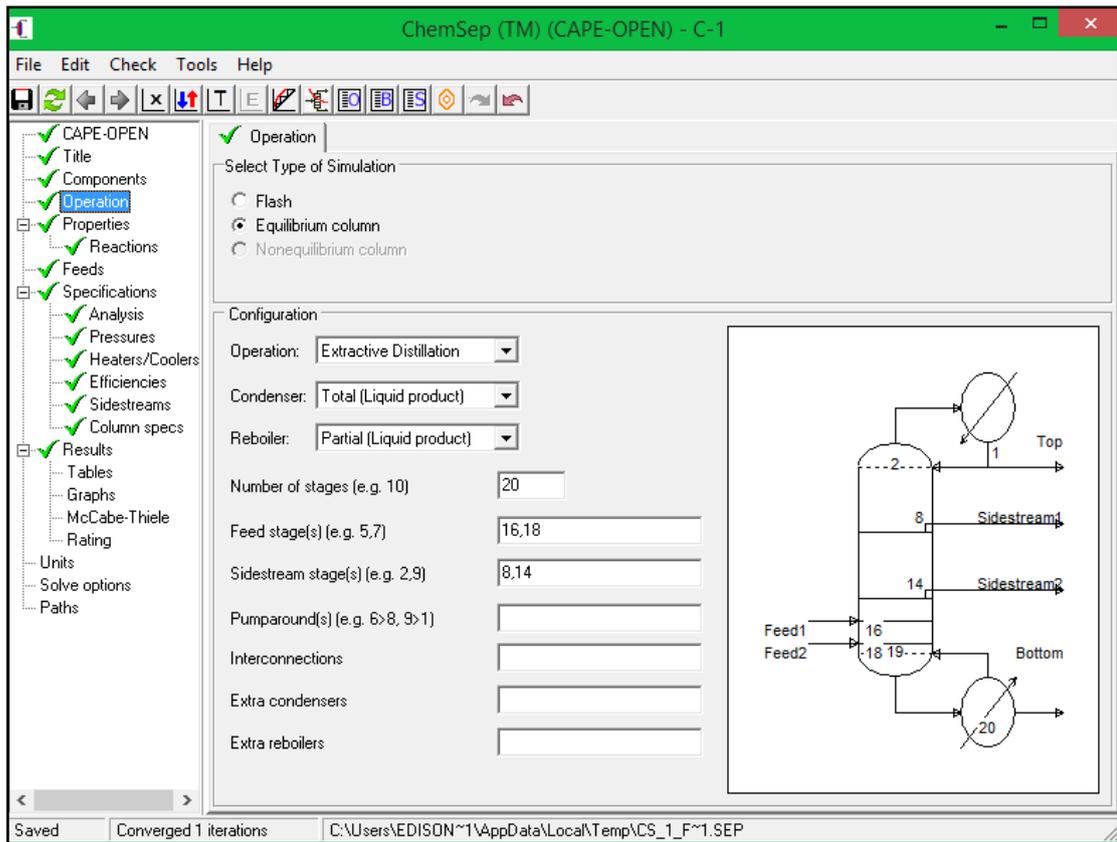


Figura 9-3: Operación de C-1 en ChemSep
 Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

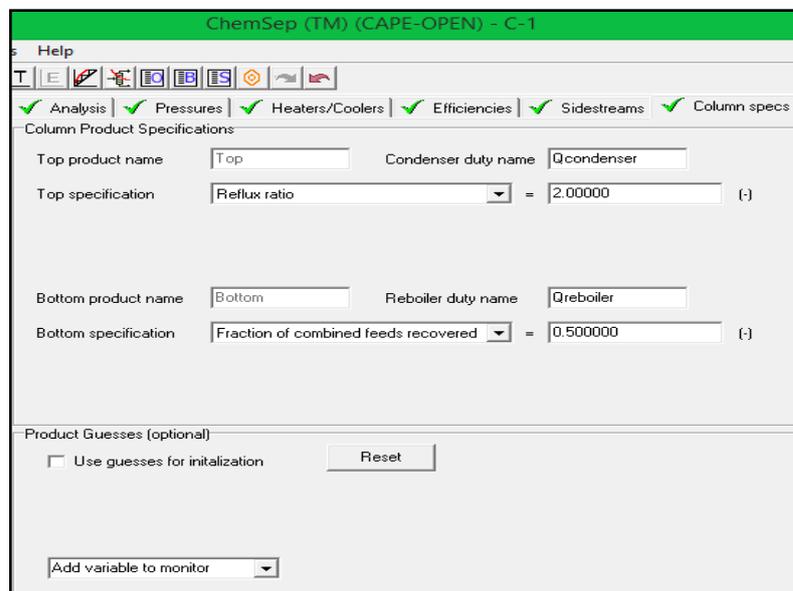


Figura 10-3: Condiciones de C-1
 Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Las condiciones del horno se presentan en la figura 10-3 en donde se muestra que es necesario ingresar la temperatura de salida que se necesita obtener que para este caso es de 360 °C

manteniendo una eficiencia del 100% idealmente sin incrementos de presión en el transcurso del calentamiento, este flujo caliente es enviado a la principal columna de fraccionamiento denominada C-2.

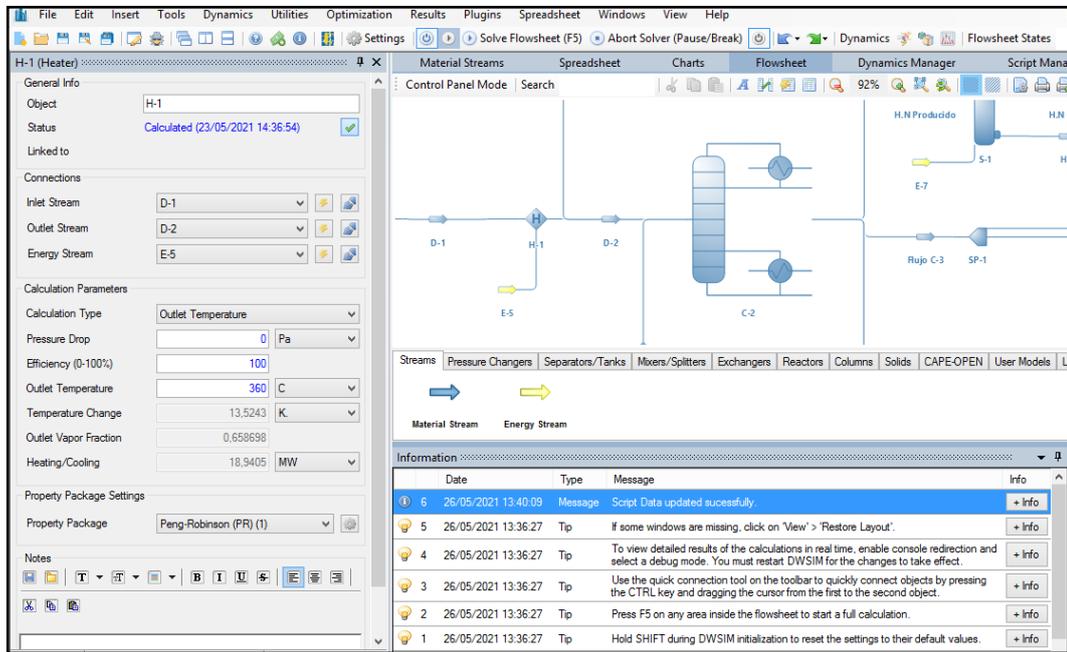


Figura 11-3: Especificaciones del horno H-1
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para la columna denominada C-2 se establecen varios parámetros de operación al igual que en la primera torre de destilación, en este caso se establece una columna en equilibrio en donde se realizará una destilación extractiva que tiene una condensación total, es decir que el producto obtenido de la cabeza de la columna estará en fase líquida, en la parte inferior se obtendrá un calentamiento parcial del líquido producido, esta torre de destilación tiene 32 platos o bandejas con múltiples flujos de entrada, la corriente proveniente de la columna C-1 ingresa en el plató 5 mientras que los reflujo obtenidos de queroseno y gasóleo ingresarán en el plató número 12 y en el 22 respectivamente, mientras que los productos que se obtienen en la columna son retirados en las etapas 11 y 23 correspondiente a la alimentación de C-3 y la alimentación de C-4. Los productos obtenidos de estas columnas secundarias sirven para poder precalentar el crudo en el sector de intercambiadores de calor. Además, en las especificaciones de las salidas de las etapas 11 y 23 se debe asignar el flujo másico que se quiere obtener de cada producto y para este caso se le asigna a la etapa 11 un flujo másico de $0,214687 \text{ kg/s}$, mientras que a la etapa 23 un flujo másico de $0,2029 \text{ kg/s}$. La presión que se mantendrá en toda la columna deberá permanecer constante a una atmósfera y las especificaciones para el condensador es de un radio reflujo de 3 con una fracción de combinación en la entrada del rehervidor de 0,5 al igual que en la columna C-1.

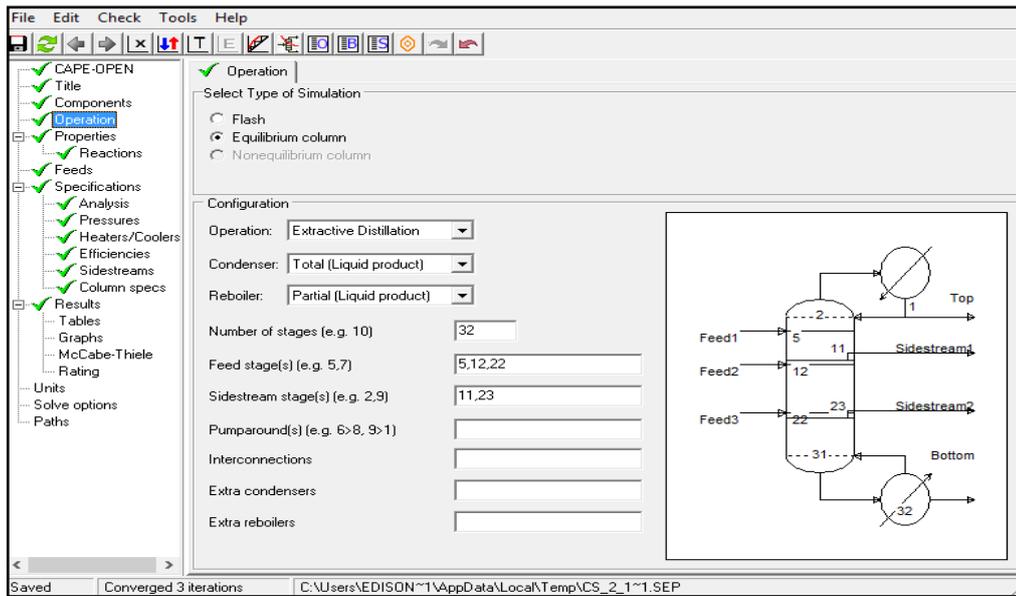


Figura 12-3: Operaciones de la columna C-2

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

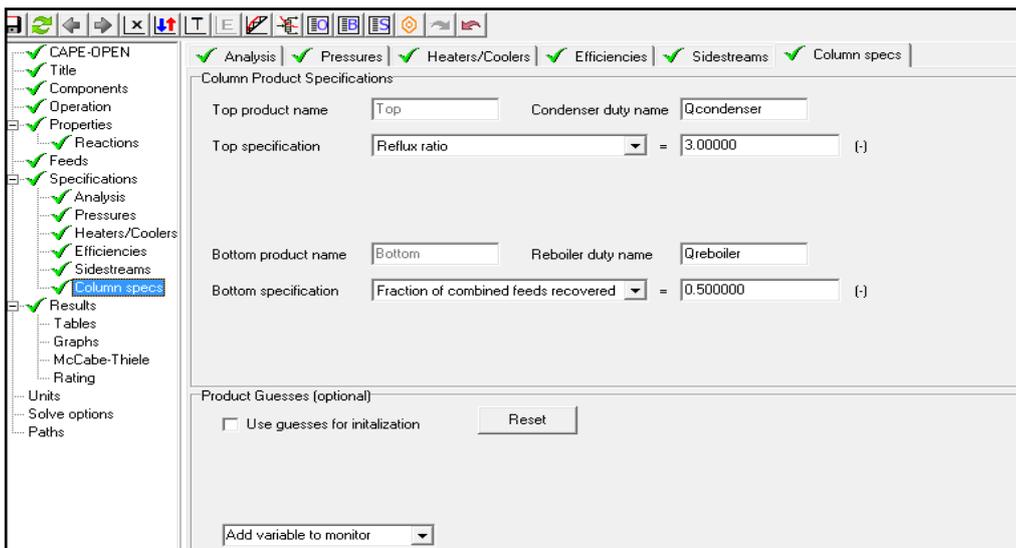


Figura 13-3: Especificaciones de la columna C-2

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Se debe tomar en cuenta los diversos bloques de recirculación que fueron añadidos debido a que la naturaleza del sistema diseñado genera varias recirculaciones hacia los diversos equipos que componen el proceso, generándose un error al momento de realizar los cálculos por el algoritmo seleccionado, más concretamente se trata de un ciclo infinito repetitivo de cálculos que colapsa la simulación, por tanto para solucionar esta problemática se procede a asignar un bloque lógico de recirculación que es capaz de detener la secuencia de cálculo en el punto en donde se esté generando la problemática de los cálculos infinitos. En este bloque lógico se puede asignar un número de iteraciones siendo para este caso de 50, también se puede proponer una temperatura y

una presión máxima de tolerancia o de variación y debido a que en este proceso de simulación solamente se necesita detener el ciclo infinito se asigna las mismas cantidades de temperatura presión y flujo másico que se tiene en la entrada de estos bloques.

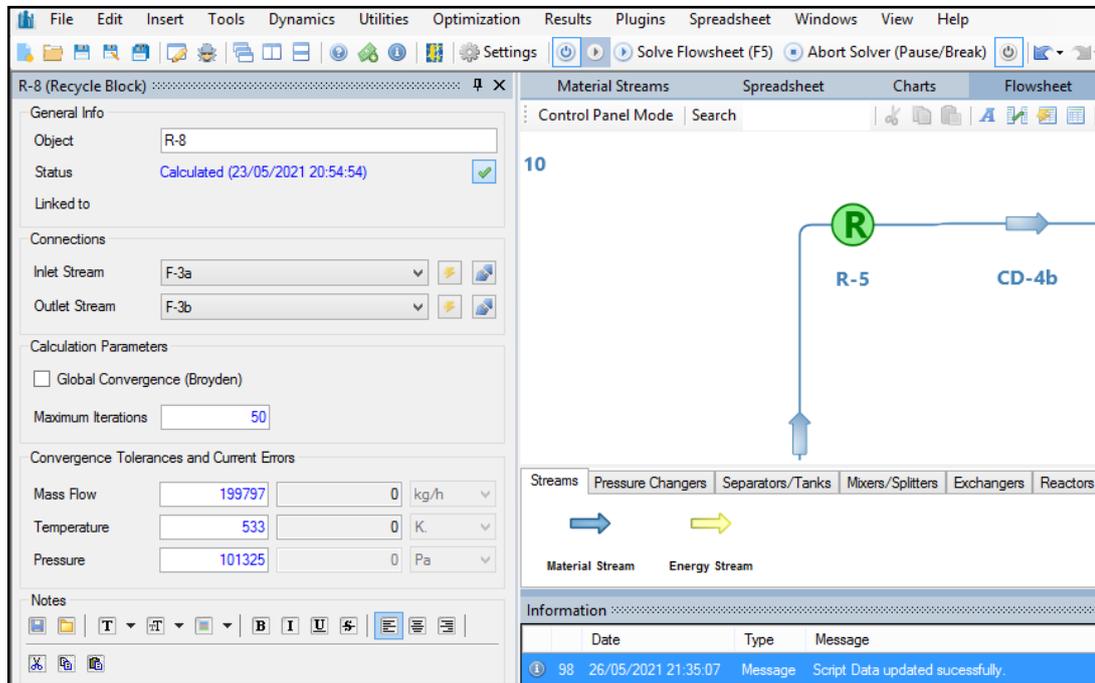


Figura 14-3: Especificaciones de los bloques de recirculación

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Para el sistema de desalado del crudo se requirió ingresar dos equipos de separación de compuestos que el software tiene entre sus herramientas, se asigna un primer separador para poder eliminar al 100% el cloruro de sodio mezclado en la línea de crudo y el segundo separador se encarga de separar el agua de la misma línea, se realizó este procedimiento debido a que un equipo de desalado de crudo es muy complejo de diseñar pero con estas dos herramientas trabajando en conjunto se logra eliminar el agua y la sal en su totalidad que es el objetivo principal de un desalador en la industria. En cada separador se debe asignar la salida y el compuesto que se desea eliminar de la línea de alimentación de estos equipos, en este caso se coloca que se desea eliminar al 100% la sal y el agua de la línea de entrada.

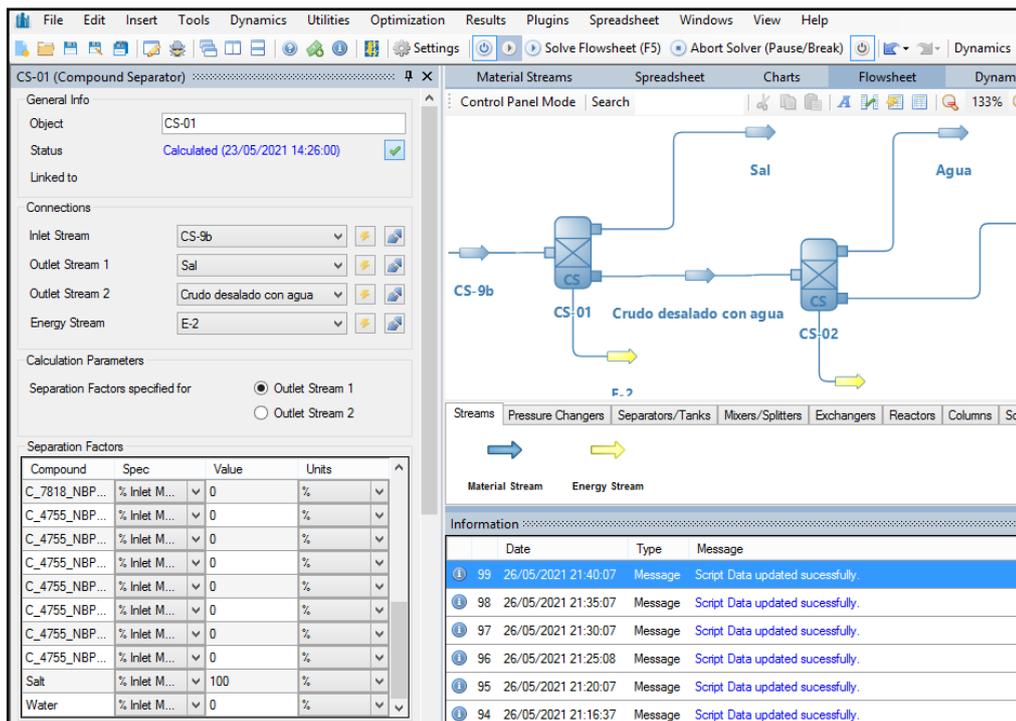


Figura 15-3: Especificaciones de los bloques de separación de compuestos
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Por último, todas las especificaciones están correctamente ingresadas ya que los equipos y las corrientes que se ubicaron en el diagrama se pusieron de color azul y al momento de correr la simulación no se dio ninguna notificación de error. Para poder visualizar los resultados de cada equipo se debe insertar una tabla que muestra las propiedades del proceso de simulación, esta tabla se insertó mediante la pestaña Insert en la propiedad Master Property Table en donde se podrá elegir cualquier equipo o corriente de la simulación.

3.4. Validación de la simulación

Para analizar y constatar que la simulación realizada funciona correctamente se toma en cuenta los resultados obtenidos al correrla, ya que deben parecerse o encontrarse en los rangos más próximos posibles a los que se obtienen en trabajos previos con temas similares al trabajo realizado, esto se puede constatar en las tablas de resultados () en donde se explica que los datos de salida de la simulación realizada son iguales a las consultadas por bibliografía generándose la confiabilidad de que el proceso se realizó de manera correcta.

Para poder observar los datos resultantes se debe utilizar las diversas herramientas que el software de DWSIM provee para visualizar resultados como se muestra en la figura 16-3 se genera varias tablas con los resultados de puntos críticos del proceso simulado que posibilita el extraer y comparar los resultados.

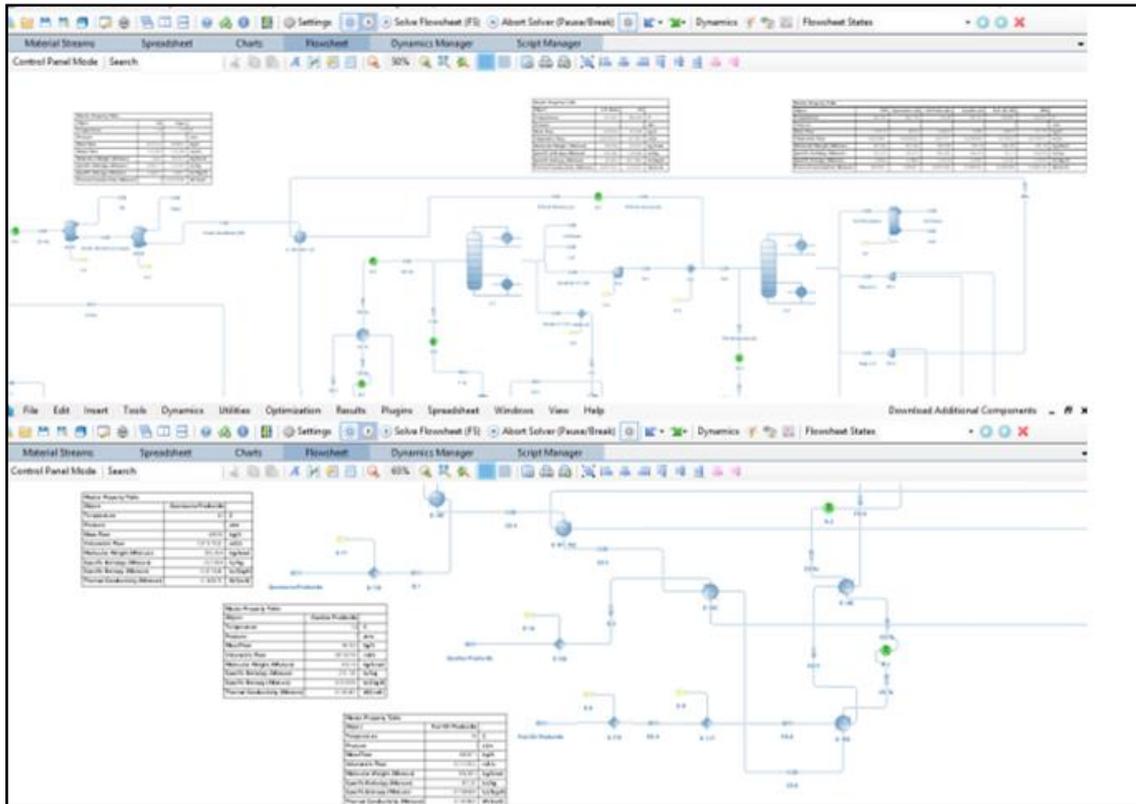


Figura 16-3: Resultados mostrados en DWSIM

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Los datos mostrados en las tablas de resultados se pueden validar y ser procesados para la creación de una red neuronal artificial que sea capaz de predecir el comportamiento de una torre de fraccionamiento en una refinería si se llegara a cambiar alguna variable en la misma.

3.5. Tratamiento de datos

Ya realizado el proceso de simulación y terminado el proceso de validación de los resultados obtenidos, se procede a realizar la creación del banco de datos que es de vital importancia para generar la red neuronal artificial, para este fin se debe analizar las variables que se van a utilizar de entrada y las variables de salida de la red. Para poder obtener los datos necesarios se procede a la repetición de la simulación cambiando los valores de las variables que se utilizaran de entrada a la red.

Para este estudio se utilizó las siguientes variables de entrada y salida provenientes de la simulación generando el banco de datos necesario para la RNA.

Tabla 5-3: Variables de entrada de la RNA

ENTRADAS		
Parámetro	Flujo de entrada de crudo	Temperatura
Detalles	Kg/h [Crudo salado]	°C [Horno y corrientes]
Identificación	Fc	T

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Para los parámetros de salida se procedió a correr la simulación realizada, pero con las variables nuevas ingresadas de manera aleatoria y se identifica los valores de las salidas de la simulación generándose así un conjunto de datos a ser entrenados por la RNA.

Tabla 6-3: Variables de salida de la RNA

SALIDAS						
Flujos masicos	Naftas Ligeras (Gas)	Naftas Ligeras	Naftas pesadas	Queroseno	Gasóleo	Fuel Oil
Identificación	L.N Gases	L.N	H.N	Q	G	F.O
Ubicación	Destilado de C-1	Destilado de C-1	Destilado de C-2	Producto de C-2	Producto de C-2	Producto de C-2

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Para la realización del banco de datos es importante el considerar los puntos de recirculación en la simulación que son los que impiden que se genere un ciclo infinito de cálculo y es necesario que al correr el programa se vuelva a correr en estos puntos de recirculación. Además, es necesario considerar los rangos de los parámetros que se van a ingresar ya que deben cumplir con la lógica que rige el proceso en la vida real.

Tabla 7-3: Datos generados para el entrenamiento y prueba de la RNA

Fc (Kg/h)	T (°C)	L.N (Gas) (Kg/h)	L.N (Kg/h)	H.N (Kg/h)	Q (Kg/h)	G (Kg/h)	F.O (Kg/h)
200000	500	93827,4	280543	415717	292519	254531	551688
300000	475	87009,8	335385	421344	295493	267640	557640
280000	480	88373,3	324416	420228	294898	265018	556449
240000	490	91100,4	302479	417968	293709	259775	554069
260000	485	89736,9	313448	419093	294303	262397	555259
252000	487	90282,3	309060	418643	294065	261348	554783
400000	450	80192,2	390228	426971	298468	280750	563592
360000	460	82919,3	368291	424720	297278	275506	561211
380000	455	81555,8	379260	425846	297873	278128	562402
388000	453	81010,4	383647	426296	298111	279177	562878
372000	457	82101,2	374872	425395	297635	277079	561926

320000	470	85646,3	346354	422469	296088	270262	558830
340000	465	84282,8	357323	423594	296683	272884	560021
348000	463	83737,4	361711	424045	296921	273933	560497
332000	467	84828,2	352936	423144	296445	271835	559544
308000	473	86464,4	339773	421794	295731	268689	442689
292000	477	87555,2	330997	420893	295255	266591	557164
268000	483	89191,4	317835	419543	294541	263444	555735
220000	495	92463,9	291511	416842	293114	257153	552878
228000	493	91918,5	295898	417292	293352	258201	553354
212000	497	93009,3	287124	416392	292876	256104	552402
500000	400	94166,9	215867	584232	337539	319007	584786
450000	425	87179,5	303048	505601	318003	299879	574189
480000	410	91371,9	250739	552779	329725	311356	580547
494000	403	93328,4	226329	574796	335195	316711,7	583514
490000	405	92769,4	233303	568505	333632	315182	582666
486000	407	92210,4	240277	562214	332069	313652	581818
474000	413	90533,4	261200	543343	327381	309060	579275
470000	415	89974,4	268174	537052	325818	307530	578427
464000	418	89135,9	278636	527616	323474	305235	577156
208000	498	93281,9	284930	416167	292757	255580	552164
216000	496	92736,5	289318	416617,3	292994	256628	552640
224000	494	92191,1	293705	417067,5	293233	257677	553117
232000	492	91645,7	298093	417518	293471	258726	553593
248000	488	90554,9	306867	418418	293947	260824	554545
256000	486	90009,5	311254,8	418868	294184	261872	555021
264000	484	89464,1	315642	419318	294422	262921	555497
272000	482	88918,7	320029	419768	294661	263969	555973
288000	478	87827,9	328804	420669	295136	266067	556925
296000	476	87282,5	333192	421119	295375	267116	557402
304000	474	86737,1	337579	421569	295613	268165	557878
312000	472	86191,7	341967	422019	295850	269213	558354
460000	420	88576,9	285611	521326	321910	303704	576308
454000	423	87738,5	296073	511891	319566	301409	575037
406000	447	81030,6	379766	436406	300812	283045	564864
410000	445	81589,5	372792	442696	302374	284575	565711
414000	443	82148,5	365818	448987	303937	286105	566559
420000	440	82987,1	355356	458422	306281	288400	567830
426000	437	83825,5	344894	467857	308625	290695	569101
430000	435	84384,5	337920	474148	310188	292226	569950
434000	433	84943,6	330945	480439	311751	293757	570798
440000	430	85782,1	320484	489875	314096	296053	573069
446000	427	86620,5	310022	499310	316440	298349	573341
365543	370	78632,8	367562	479273	286355	270530	504276
486554	397	92613,5	231036	573736	332421	314159	576735
477591	395	91577,8	241150	566739	329008	310928	571368

468627	393	90542,2	251262	559742	325596	307696	566000
455181	390	88988,8	266432	549246	320478	302848	557949
441753	387	87435,3	281602	538750	315359	298000	549898
432772	385	86399,8	291715	531753	311947	294769	544531
423807	383	85364,2	301828	524755	308535	291537	539164
410362	380	83810,8	316997	514259	303416	286689	531112
396916	377	82257,4	332167	503763	298297	281841	523062
387953	375	81221,8	342279	496766	294886	278610	517694
378989	373	80186,2	352393	489769	291473	275378	512327
583334	360	64749,9	319500	388928	236162	223340	400471
409101	368	75856,2	357949	461204	276316	261092	483515
474439	365	71681,3	343531	434100	261259	246935	452374
517997	363	68914,7	333918	416032	251220	237497	431613
30000	340	94214,6	207183	577634	337379	318968	584826
528000	358	67696,3	308268	407798	246284	232903	418907
445000	355	72116,1	291421	436104	261466	247247	446560
389667	353	75062,5	280189	454975	271588	256810	464995
306667	350	79482,2	263342	483281	286771	271154	492648
223667	347	83901,9	246494	511587	301953	285498	520302
168334	345	86848,4	235262	530458	312075	295061	538737
113000	343	89794,9	224030	549328	322197	304624	557173
50000	320	94166,9	215867	578522	337420	318979	584907
32000	338	94209,8	208051	577723	337383	318969	584834
34000	336	94205,1	208919	577812	337387	318970	584842
36000	334	94200,2	209788	577900	337391	318971	584850
38000	332	94195,5	210656	577989	337395	318972	584858
40000	330	94190,7	211525	578078	337400	318974	584867
42000	328	94185,9	212393	578166	337404	318975	584875
44000	326	94181,2	213262	578256	337408	318976	584883
46000	324	94176,4	214130	578344	337412	318977	584891
48000	322	94171,6	214999	578433	337416	318978	584899
450000	300	78431,7	378005	461326	283441	268442	489354
70000	319	93380,1	223974	572662	334721	316452	580129
110000	317	91806,6	240187	560942	329323	311398	570574
150000	315	90233,1	256401	549223	323925	306345	561017
190000	313	88659,5	272615	537503	318527	301291	551463
230000	311	87086,1	288829	525784	313130	296237	541908
270000	309	85512,5	305042	514064	307732	291183	532353
310000	307	83939,1	321256	502344	302333	286130	522797
350000	305	82365,5	337471	490625	296936	281076	513242
390000	303	80791,9	353684	478905	291538	276023	503687
430000	301	79218,4	369898	467186	286140	270979	494132
95000	250	94059,5	235302	578734	337449	318986	584967
442900	299	78744,3	375151	463674	284521	269453	491266
428700	297	79369,4	369443	468371	286682	271475	495091

414500	295	79994,5	363735	473066	288842	273496	498915
400300	293	80619,6	358027	477763	291002	275518	502740
386100	291	81244,7	352316	482459	293162	277539	506564
371900	289	81869,8	346610	487155	295323	279562	510389
357700	287	82494,9	340902	491852	297483	281583	514213
343500	285	83120,1	335194	496548	299643	283605	518038
329300	283	83745,1	329486	501244	301804	285627	521862
315100	281	84370,3	323778	505941	303964	287649	525686
300900	279	84995,4	318069	510637	306124	289671	529512
286700	277	85620,5	312362	515333	308284	291692	533336
272500	275	86245,6	306653	520030	310445	293714	537160
258300	273	86870,7	300945	524726	312605	295736	540985
244100	271	87495,8	295237	529423	314766	297758	544809
229900	269	88120,9	289529	534119	316926	299779	548634
215700	267	88746,1	283821	538815	319086	301801	552459
201500	265	89371,2	278113	543512	321247	303823	556283
187300	263	89996,3	272405	548208	323407	305845	560108
173100	261	90621,4	266696	552904	325567	307866	563932
158900	259	91246,5	260989	557600	327728	309888	567757
144700	257	91871,6	255280	562296	329887	311909	571581
130500	255	92496,7	249572	566993	332048	313931	575406
116300	253	93121,8	243864	571690	334209	315953	579230
102100	251	93746,9	238156	576385	336369	317975	583055
100000	200	94047,8	237459	579262	337467	318991	585007
95100	249	94059,3	235345	578747	337449	318986	584968
95300	247	94058,8	235431	578766	337450	318986	584969
95500	245	94058,3	235518	578787	337451	318987	584971
95700	243	94057,9	235604	578807	337452	318987	584973
95900	241	94057,4	235690	578829	337452	318987	584974
96100	239	94056,9	235777	578850	337453	318987,1	584976
96300	237	94056,5	235863	578871	337454	318987,3	584977
96500	235	94055,9	235949	578892	337454	318988	584979
96700	233	94055,5	236035	578914	337455	318988	584980
96900	231	94055,1	236122	578935	337456	318988,1	584982
97100	229	94054,6	236207	578956	337457	318988,3	584984
97300	227	94054,1	236294	578977	337457,3	318988,3	584985
97500	225	94053,7	236381	578998	337458	318988,5	584987
97700	223	94053,1	236466	579019	337459	318988,7	584989
97900	221	94052,7	236553	579040	337459,4	318988,9	584990
98100	219	94052,3	236639	579061	337460	318989,1	584992
98300	217	94051,7	236726	579083	337461	318989,3	584993
98500	215	94051,3	236812	579104	337462	318989,5	584995
98700	213	94050,8	236898	579124	337462,3	318989,7	584996
98900	211	94050,4	236985	579146	337463	318989,9	584998
99100	209	94049,9	237071	579167	337464	318990,1	584999

99300	207	94049,4	237157	579188	337465	318990,3	585001
99500	205	94048,9	237243	579209	337465,2	318990,5	585003

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

De todo el universo de datos generados se considera el 20 % de estos para la validación de la red ya terminada por tanto estos elementos seleccionados no intervienen en ninguna parte del entrenamiento de la red creada y se deben tomar de manera aleatoria para mejorar la efectividad de la validación.

3.6. Creación de la red neuronal artificial

Como primer paso para la creación de la red neuronal artificial se realizó el establecimiento de las variables que van a ser tomadas como entradas y salidas de estas, lo mismo que se explica en las tablas 5-3 y 6-3. Con el contenido del banco de datos se ingresan al software que en este caso es Matlab un conjunto de matrices que corresponden a las salidas y datos de entrenamiento previamente normalizados o lo que es lo mismo transformar los valores ya establecidos en un conjunto de datos que van desde 0 a 1 para poder obtener un entrenamiento más eficiente de la red. Una característica para ingresar variables en el software es en tipo vector por tanto se debe transformar las columnas de la tabla de Excel en filas en el mismo orden.

Fc (Kg/h)	200000	300000	280000	240000	260000	252000	400000	360000	380000	388000	372000	320000
T (°C)	500	475	480	490	485	487	450	460	455	453	457	470
L.N (Gas) (Kg/h)	93827,4	87009,8	88373,3	91100,4	89736,9	90282,3	80192,2	82919,3	81555,8	81010,4	82101,2	85646,3
L.N (Kg/h)	280543	335385	324416	302479	313448	309060	390228	368291	379260	383647	374872	346354
H.N (Kg/h)	415717	421344	420218	417968	419093	418643	426971	424720	425846	426296	425395	422469
Q (Kg/h)	292519	295493	294898	293709	294303	294065	298468	297278	297873	298111	297635	296088
G (Kg/h)	254531	267640	265018	259775	262397	261348	280750	275506	278128	279177	277079	270262
F.O (Kg/h)	551688	557640	556449	554069	555259	554783	563592	561211	562402	562878	561926	558830

Figura 17-3: Variables en forma de vectores

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Se debe proponer una arquitectura para la red y se correlaciona con la cantidad de datos que se vayan a utilizar ya que a mayores datos más compleja será la arquitectura y el número de capas de la red neuronal artificial. Matlab proporciona varias herramientas para crear redes neuronales como son los comandos nftool y nntool en los dos casos permiten el acceso a las librerías necesarias para diseñar una red neuronal, por la facilidad de diseño que permite el comando nntool es el que se utilizó para el diseño. Al aplicar este comando se abre la ventana del toolbox de Matlab en donde se muestra todas las actividades que se requieren para crear una red. En la parte inferior izquierda está el botón (Import) que permite cargar los datos de las variables guardadas previamente.

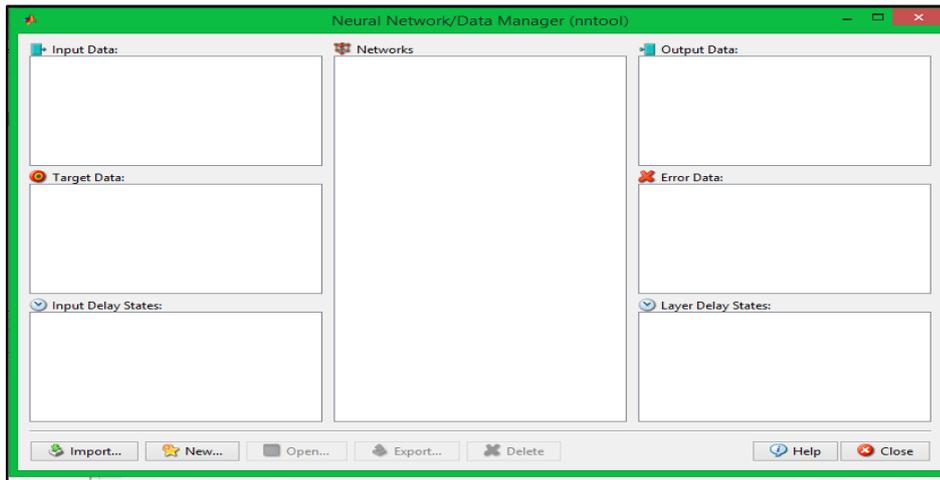


Figura 18-3: Ventana de la herramienta nntool
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Se cargo los datos guardados en la variable entrada como datos de alimentación o Input Data y los datos guardados en la variable denominada como salida se suben a la sección de datos objetivo o datos de entrenamiento (Target Data). Seguido a esto se procede a crear ya la arquitectura de la red neuronal en la sección de new.

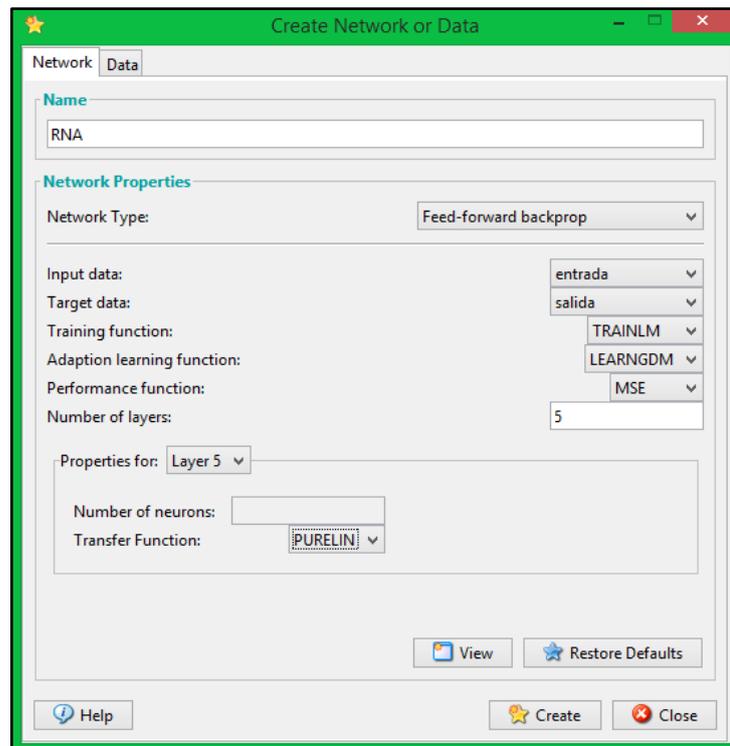


Figura 19-3: Propiedades de la RNA
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Se procede a seleccionar un nombre para la red creada en este caso RNA y se realizó la selección de las propiedades. Como tipo de red se utiliza la de Feed-forward backprop que se define por la

capacidad de fluir la información de forma unidireccional para que se permita el paso de información por una neurona solo una vez antes de generarse los pesos sinápticos presentes en cada neurona. Como función de entrenamiento se establece la denominada TRAINLM (Levenberg-Marquardt) este algoritmo es también conocido como el de los mínimos cuadrados se utilizó para poder resolver problemas no lineales y permite aproximar diversos ajustes en las curvas de las funciones. Como función de aprendizaje se elige la función LEARNGDM que está en función del gradiente descendiente y por último se establece la función MSE que mide el error cuadrático medio en el entrenamiento. Por último, se establece la arquitectura de la red definiéndose que contiene 1 capa de entrada con dos neuronas a su ingreso 4 capas ocultas con 50 neuronas cada una y una capa de salida con 6 neuronas, todas las capas de entrada y ocultas contienen la función tangente-sigmoidal (TANSIG) y la capa de salida tiene la función PURELIN que permite valores de cualquier tipo para la salida de la red.

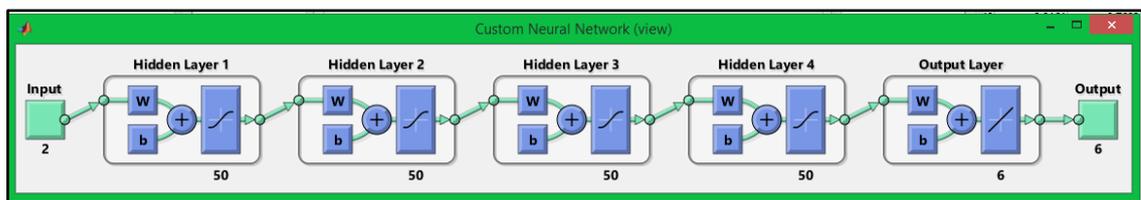


Figura 20-3: Arquitectura de la RNA

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

3.7. Entrenamiento y aprendizaje de la RNA

Esta etapa del proceso de diseño de las redes neuronales es el más importante debido a que es el proceso en el cual se define la eficiencia de la red creada y en el caso de ser deficiente la red neuronal será deficiente, también es en donde se ingresa la tipología de la red neuronal y el algoritmo que se va a emplear para el aprendizaje.

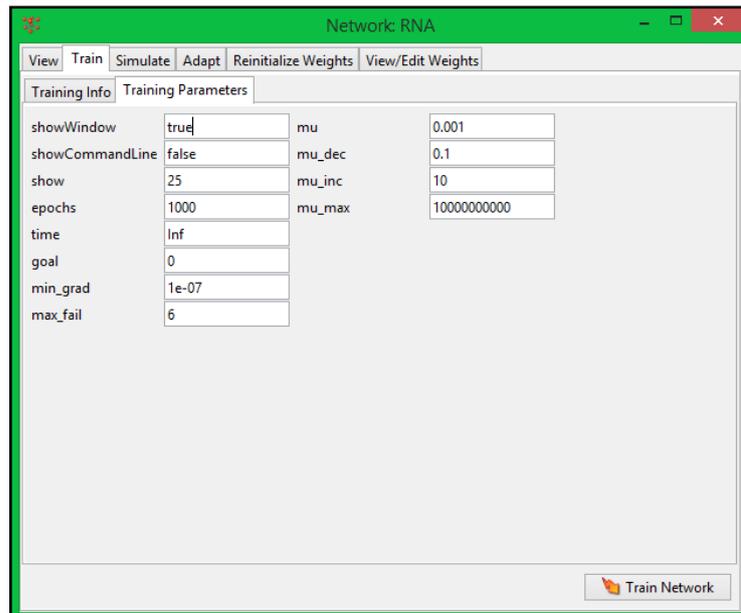


Figura 21-3: Parámetros de entrenamiento de la RNA

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

Una vez creada la red neuronal se procedió a realizar su entrenamiento, para esto se abre la red en la misma plataforma del toolbox. En esta ventana se abrirá un conjunto de opciones de configuración para la red neuronal la que se utilizó para el entrenamiento de la red es la sección Train en donde se subdividen los parámetros y la información que ingresara al entrenamiento. Como información ingresa las variables de entrada establecidas y los parámetros de entrenamiento que son los más importantes están el número de épocas o iteraciones, el mínimo gradiente de error permitido u objetivo y el máximo de fallos en la validación. Estos parámetros deben ser ingresados de manera aleatoria al inicio y de manera manual deben irse ajustando hasta obtenerse un error cuadrático medio aceptable. En la RNA se estableció 10000 épocas con un mínimo gradiente de 0,0000001 y un máximo de fallos de 60 dándose inicio al entrenamiento de la red.

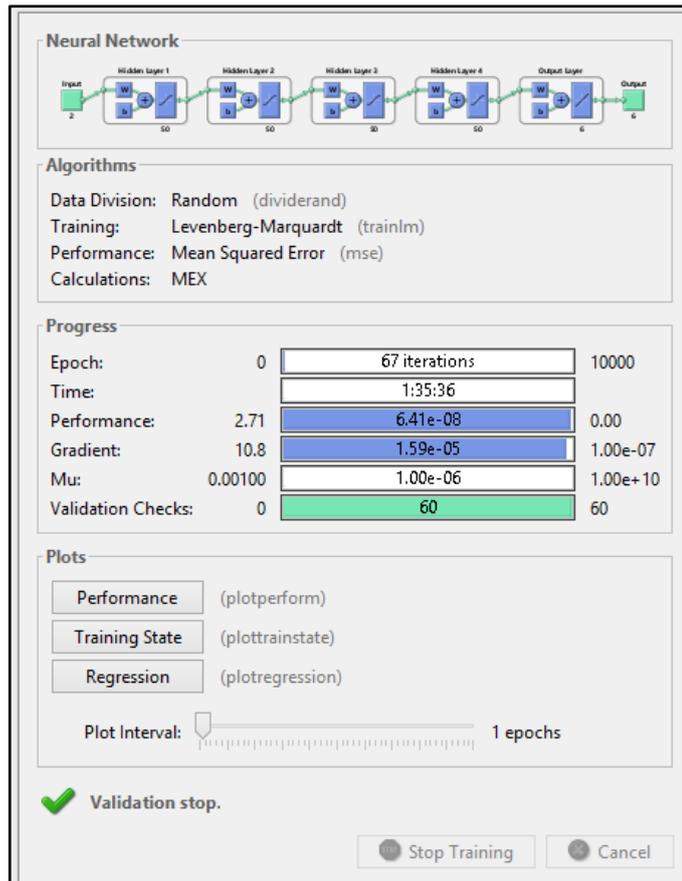


Figura 22-3: Entrenamiento de la RNA
 Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

El tiempo que se tarde en el entrenamiento dependerá de la cantidad de datos que se ingresen y de la arquitectura que se disponga en este caso se aplicó un tiempo de entrenamiento de una hora y 35 minutos para poder alcanzar el objetivo de entrenamiento y el error mínimo posible en las predicciones de la red. Terminado el entrenamiento se puede observar los resultados de este mediante graficas que proporciona el mismo programa.

El error cuadrático medio alcanzado por el entrenamiento de la red neuronal es de 0,0016801, el cual permite una predicción optima de los valores ingresados en la red neuronal, debido a la cantidad y tipo de datos ingresados cada época se tarda en promedio 2 minutos para ser calculada por tanto el objetivo se cumplió en un rango de 55 épocas, siendo en la época 5 en donde se cumple el error más bajo ya que de ahí en adelante se mantendrá en un valor constante subiendo y bajando al mínimo en las demás iteraciones.

Otro punto de control es analizar las gráficas de la regresión lineal resultantes en el entrenamiento en donde se muestra la correlación que existe entre los datos ingresados y los datos simulados ya que mientras más se acerquen al valor de 1 más precisa será la red en la predicción de los valores que sean ingresados y en la red se obtuvo una correlación de 0,09954 tan próxima a 1 cómo es posible.

Ya con estos datos se procedió a exportar la información de RNA al workspace de Matlab para ser almacenado y utilizado cuando se requiera. Es de suma importancia que al momento de ejecutar la red creada se debe utilizar el comando RNA ([num num]') en donde se ingresa el nombre de la red en este caso RNA y los valores de entrada en forma de vector.

3.8. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se procedió con la utilización de las pruebas más utilizadas en la comparación de las variables dentro de un estudio investigativo como son la prueba de Kruskal-Wallis que es similar a la prueba de ANOVA que fluye en solo una vía y la prueba Friedman que es la más utilizada cuando existen más de 3 grupos de datos experimentales como lo es en este caso, al igual que con la prueba ANOVA este es similar cuando fluye en dos vías la información.

Prueba de Kruskal-Wallis. - Esta prueba fue creada por William Kruskal y Allen Wallis y se define como un método no paramétrico que es capaz de probar si un conjunto de datos se deriva de la misma población ya establecida es similar a la prueba ANOVA y se deriva de la prueba de U de Man Whitney (Siegel, y otros, 1988 pág. 25).

Prueba Friedman. - Esta prueba es una no paramétrica que fue creada por el economista Milton Friedman que intenta simular a la prueba de ANOVA cuando existen varias medidas en repetición, este método clasifica datos en filas o bloques que son reemplazados por un orden en donde se evidenciara si existen varios datos repetidos (Flores, y otros, 2017 págs. 368-369).

CAPÍTULO IV

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1. Presupuesto

Tabla 1-4: Presupuesto del trabajo de titulación

PRESUPUESTO			
ACTIVIDAD	MONTO	FUENTE DE FINANCIAMIENTO	
		EXTERNA	INTERNA
Investigación (Internet)	\$ 70		X
Suscripciones a cursos de redes neuronales	\$ 40		X
Copias e Impresiones	\$ 50		X
Empastados	\$ 60		X
TOTAL	\$ 220		

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

4.2. Recursos y Materiales

Para la realización del programa de titulación se utilizó varios softwares como:

- ❖ Software de código libre DWSIM para la simulación de la planta de procesamiento de crudo. CAPE-OPEN de ChemSep que es la herramienta que complementa la simulación de procesos de refinería.
- ❖ MATLAB en la versión R2017a utilizado para la creación de la red neuronal.
- ❖ Software ECXEL de office en la creación de tablas y listas

Todas las tareas adicionales del proyecto se realizaron en un ordenador Intel(R) Core(TM) i5-3317U 1.70 GHz que contiene 6 GB de memoria RAM, sistema operativo de 64 bits y Windows 8 Profesional.

4.3. Cronograma

Tabla 2-4: Cronograma del trabajo de titulación

ACTIVIDADES	MESES																											
	JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE							
	SEMANAS																											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Revisión e investigación bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																
Elaboración del anteproyecto		■	■	■																								
Determinación de variables y composiciones del crudo				■	■																							
Simulación de la columna de fraccionamiento de crudo en procesos de refinación					■	■	■	■	■																			
Obtención de datos simulados									■	■																		
Comparación y validación de datos											■	■	■															
Redacción del trabajo final			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Análisis de costos		■	■	■																								
Revisión del documento final																					■	■	■	■	■	■		
Defensa de resultados																											■	■

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

4.4. Discusión y análisis de resultados

4.4.1. Resultados de la simulación en el software DWSIM

La simulación del proceso de fraccionamiento de crudo se realizó en el software de código libre DWSIM y como se pudo apreciar en el capítulo anterior se requirió de varios pasos fundamentales para poder obtenerse una simulación correcta, a pesar de ya tener un modelo en el cual se basó este trabajo la simulación requirió de varios cambios para que sea capaz de adaptarse al software.

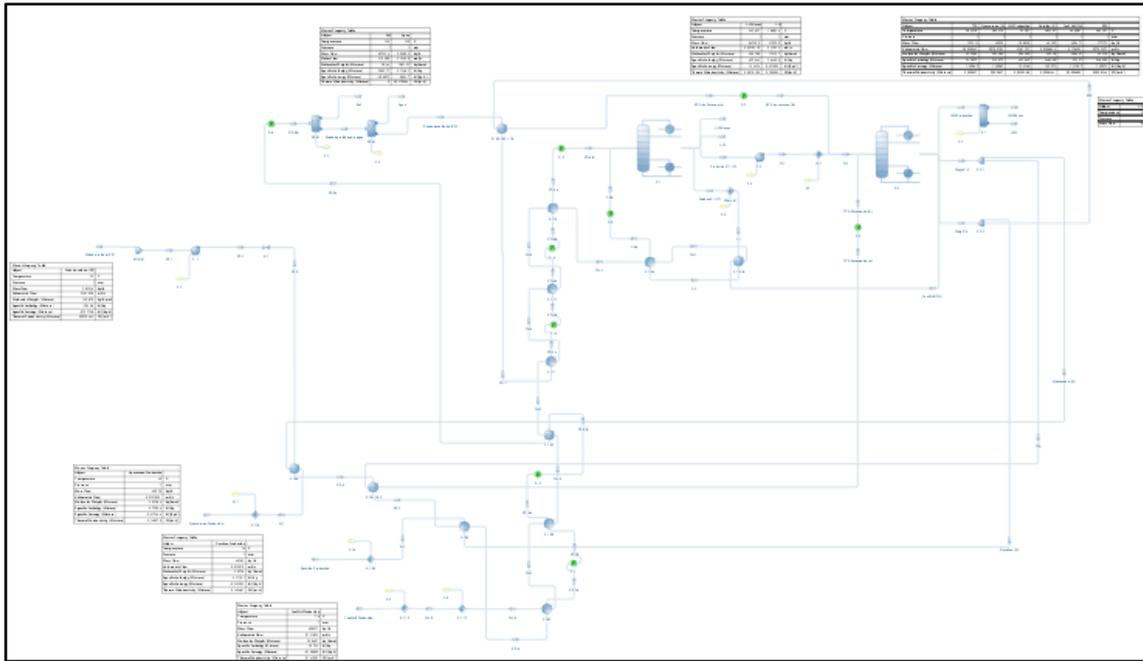


Figura 1-4: Validación de la simulación en DWSIM

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

El punto más crítico de la simulación fueron el poder realizar las diferentes recirculaciones de todo el proceso debido a que el programa realiza cálculos de cada componente o equipo diferenciando la entrada y la salida, por tanto, al realizarse una recirculación se crean bucles de cálculos que tienden al infinito provocando que la simulación falle. Para solucionar este tipo de problemas se añaden bloques de reciclaje en donde se puede depurar los datos que se recirculen sin provocar los llamados bucles de cálculo, se añadieron estos bloques en todos los puntos que se requieren debido que la eficiencia de la planta simulada depende en gran medida de varios intercambiadores de calor que están recirculando el calor de las líneas de salida de los productos con las líneas de alimentación para poder precalentar a estas últimas y ahorrar más energía invertidas en los hornos y las torres de destilación.

Tabla 3-4: Resultados de la columna de destilación C-1

COLUMNA DE DESTILACIÓN C-1					
LÍNEA	L.N gases	L.N	FONDOS C-1	CRUDO C-1	UNIDAD
Temperatura	345,637	166,834	453,941	346,477	C°
Presión	1	1	1	1	atm
Flujo masico	64749,9	319500	748138	414597	Kg/h
Flujo volumétrico	0,0279518	0,13053	0,338007	0,178966	m³/s
Flujo molecular	299,768	179,107	419,396	301,206	Kg/kmol
Entalpia especifica	495,042	-7,64286	840,79	497,657	Kj/Kg
Entropía especifica	1,22474	0,231892	1,7876	1,23185	Kj/[Kg*K]
Conductividad térmica	0,0919182	0,109292	0,0853745	0,0919485	W/[m*K]

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Los resultados que se obtuvieron de la primera columna de destilación diseñada se puede apreciar en la tabla 3-4 en donde solo dos productos son obtenidos y separados del proceso de refinación tal como sale de la columna C-1 que son las naftas ligeras en la fase gaseosa y liquida siendo la fracción gaseosa la que mayor cantidad de flujo tiene, seguido de los fondos obtenidos que son recirculados a las líneas de alimentación de la misma torre y el flujo de crudo es trasladado a la torre de destilación C-2.

Tabla 4-4: Resultados de la columna de destilación C-2

COLUMNA DE DESTILACIÓN C-2						
LÍNEA	TPA	Queroseno	H.N	Gasóleo (G)	Fuel Oil (FO)	UNIDAD
Temperatura	362,276	362,276	344,91	362,397	364,067	C°
Presión	1	1	1	1	1	atm
Flujo masico	195212	40950	388928	46165	400471	Kg/h
Flujo volumétrico	0,085895	0,0180182	0,167727	0,0206693	0,176202	m³/s
Flujo molecular	305,564	305,564	299,599	305,76	308,491	Kg/kmol
Entalpia especifica	545,875	545,875	492,845	546,288	551,51	Kj/Kg
Entropía especifica	1,29865	1,29865	1,22146	1,29973	1,31287	Kj/[Kg*K]
Conductividad térmica	0,089627	0,089627	0,092027	0,0896344	0,0896689	W/[m*K]

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Los flujos obtenidos en la segunda columna de destilación C-2 se distribuyen a las diferentes recirculaciones como es la línea BPA Y TPA que transportan el crudo residual a recalentar varios intercambiadores de calor y se realimenta a las columnas de destilación. Las líneas de productos que se obtiene directamente de la C-2 es la de naftas pesadas (H.N), queroseno, gasóleo y Fuel

Oíl. Estas líneas de fluido se envían a una serie de intercambiadores de calor que ayudan a disminuir la temperatura de estos productos y precalientan el crudo de alimentación que va a entrar al sistema de fraccionamiento.

4.4.2. Resultados de la validación de la simulación

Para poder realizar la validación de la simulación se debe hacer referencia al trabajo realizado por (Bayomie, y otros, 2019) que fue el artículo en el cual se basa la simulación realizada. En este artículo se expone una tabla de resultados solo las temperaturas y flujos de los componentes que integran el equipo completo por tanto se pueden validar solamente mediante una comparación de temperaturas y flujos.

Tabla 5-4: Resultados de la validación de la simulación

LÍNEA	Flujo masico (Kg/h)	Temperatura (C°)
Queroseno	40950	146
Queroseno Simulado	40950	362,276
% ERROR	0	1,481342466
TPA	113578	176,6
TPA Simulado	195212	362,276
% ERROR	0,718748349	1,051392978
Gasoil	46165	226
Gasoil Simulado	46165	362,397
% ERROR	0	0,603526549
BPA	99879	254,4
BPA Simulado	177175	362,397
% ERROR	0,773896415	0,424516509
Fuel Oil	156963	312,8
Fuel Oil Simulado	400471	364,067
% ERROR	1,551371979	0,163897059
L.N	52690	110
L.N Simulado	319500	166,834
% ERROR	5,063769216	0,516672727
H.N	59376	130
H.N Simulado	388928	344,91
% ERROR	5,550255996	1,653153846

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Como se puede observar en la tabla 5-4 las diferentes predicciones resultantes fueron analizadas de manera individual para extraer el error que mantengan las predicciones realizadas, notándose que existen varios valores que se aproximan a los esperados, pero existiendo también varios valores que se están alejando demasiado de los esperados. Este problema se da debido a que los

datos utilizados para la validación son extraídos de una simulación realizada en el software de Aspen HYSYS, este programa tiene variaciones en paquetes termodinámicos y equipos con respecto al software DWSIM y por tanto se espera cambios en la respuesta. Pero el problema principal radica en la forma en que estos programas simulan las propiedades del crudo debido a que esta sustancia es una combinación de varios hidrocarburos y estos programas tienen herramientas de simulación por curvas de destilación de petróleo pero la variación más mínima en la simulación de estas fracciones resultara en cambios evidentes en la composición de cada pseudocomponente y por tanto de las propiedades fisicoquímicas del flujo alimentado en la simulación permitiendo así que existan variaciones en las respuestas. Por tanto, se comprenden que existan estos rangos de errores, pero no se alejan del comportamiento real del equipo simulado.

4.5. Resultados obtenidos por la RNA

La arquitectura de la red neuronal artificial creada fue establecida mediante ajustes de prueba y error debido a que no existe una técnica o herramienta capaz de proporcionar una arquitectura definida debido a la gran flexibilidad de los datos que se pueden ingresar en una red neuronal, el diseño establecido se divide en: dos neuronas en la capa de entrada de la red, 4 capas ocultas con 50 neuronas en cada capa y una capa de salida con 6 neuronas. Esta red es de tipo Feed-forward backprop y tiene un algoritmo de entrenamiento basado en TRAINLM (Levenberg-Marquardt), con un tiempo de entrenamiento de una hora y 35 minutos.

Se sabe que el entrenamiento fue exitoso debido a que se obtuvo un error cuadrático medio de 0,0016801 en la quinta iteración, después de este punto se mantiene el comportamiento constante en las demás iteraciones, pero la meta cumplida para detenerse el entrenamiento es la validación en la prueba realizada por el mismo programa al resultar los 60 datos resultantes.

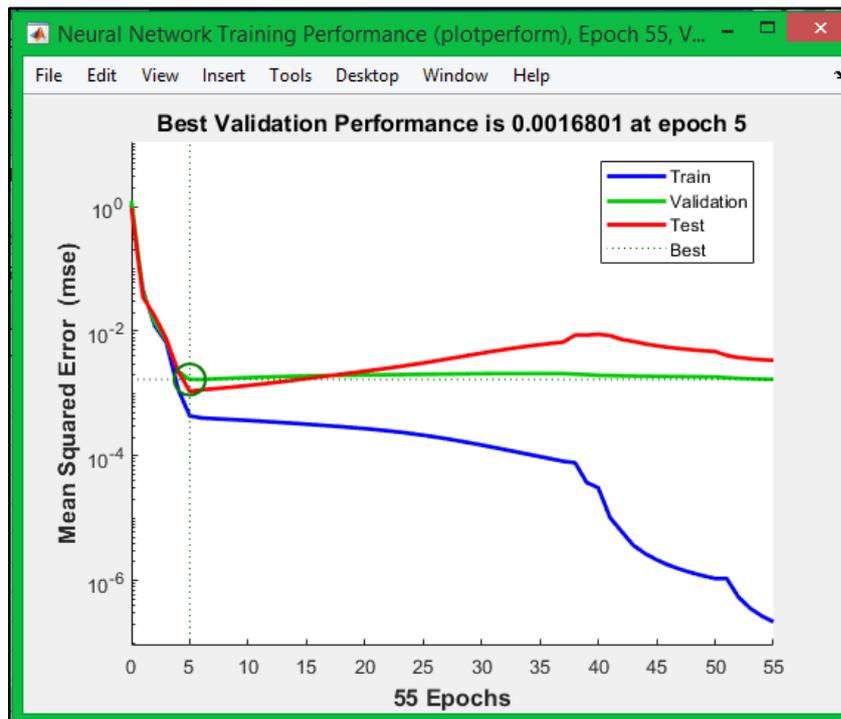


Figura 2-4: Resultados del entrenamiento de la RNA
Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

En la figura 2-4 se puede apreciar la evolución del entrenamiento en línea azul la validación en línea verde y la prueba en línea roja, mientras más iteraciones se den el programa fuerza al entrenamiento a reducir el error pero la validación y la prueba mantienen un comportamiento diferente y se establece que para este caso mientras más iteraciones se den el error en la validación seguirá bajando pero a un grado muy lento por tanto después de cumplir alguno de los objetivos del programa se detiene por defecto.

El indicador más referente para comprobar que la red neuronal funciona correctamente en la predicción de los datos ingresados es la correlación existente entre los datos ingresados para el entrenamiento y los datos predichos por la RNA los cuales se pueden observar en la figura 3-4 en donde se exponen que para el entrenamiento existe una correlación de 0,9973, para la validación de 0,9881, para la prueba 0,9928 y como promedio final para toda la red se registra una correlación final de 0,9954 aceptable para decir que la red creada tiene una eficiencia y precisión en la predicción de los productos resultantes de la torre de fraccionamiento estudiada.

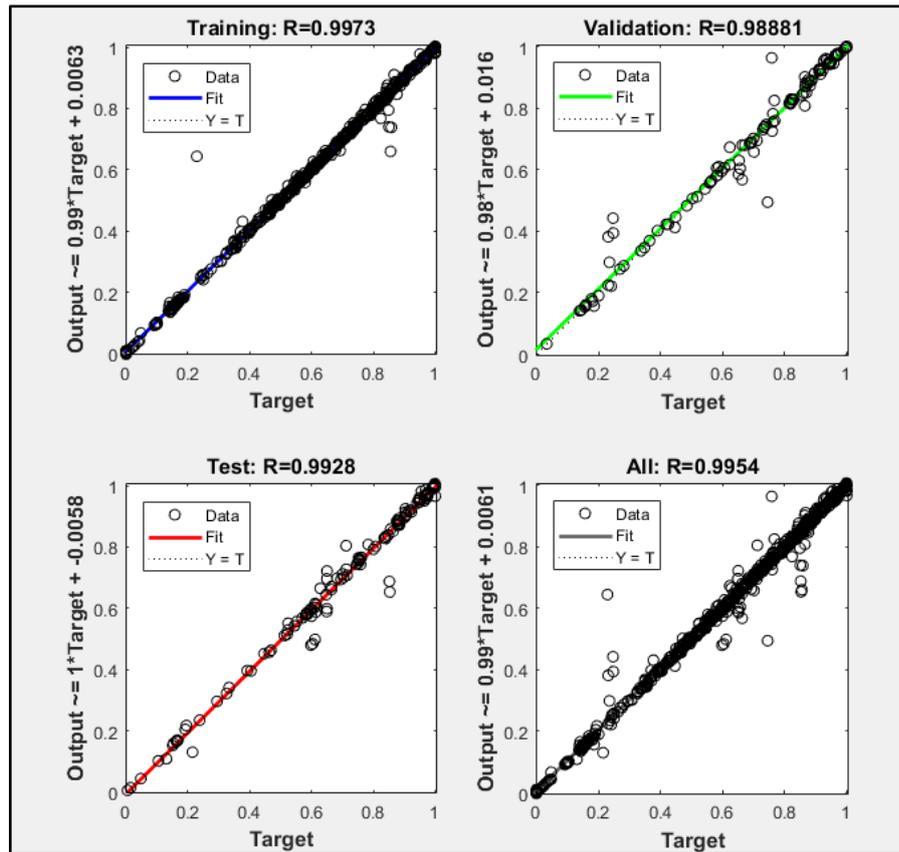


Figura 3-4: Correlación del entrenamiento de la RNA

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

4.5.1. Comparación de los datos simulados con datos experimentales

Los datos obtenidos en la simulación son comparados con los datos obtenidos en la RNA para poder comparar los resultados del programa con resultados obtenidos de manera experimental y observar que influencia existe entre los datos del programa con datos calculados experimentalmente.

En los anexos A y B se pueden apreciar la comparación de todos los datos resultantes de la simulación y la predicción de la RNA, todo esto es reunido en la tabla 6-4 en donde se muestra el porcentaje de error promedio existente en la comparación de cada variable del sistema, obteniéndose un valor general de error del 0,4812 % que resulta ser un error aceptable y se asemeja al obtenido por el software donde se realizó la experimentación.

Tabla 6-4: Resultados de la comparación de valores reales y predichos

LÍNEAS	% Error Promedio
Naftas Ligeras (L.N)	0,27268628
Naftas Pesadas (H.N)	0,7086
Queroseno (Q)	0,15409
Gasóleo (G)	0,50068
Fuel Oil (F.O)	0,77034
Error general	0,481279256

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

En la figura 4-4 se puede apreciar el comportamiento de los datos referentes a la variable de naftas.

En donde se encuentran comportamientos similares con los analizados anteriormente.

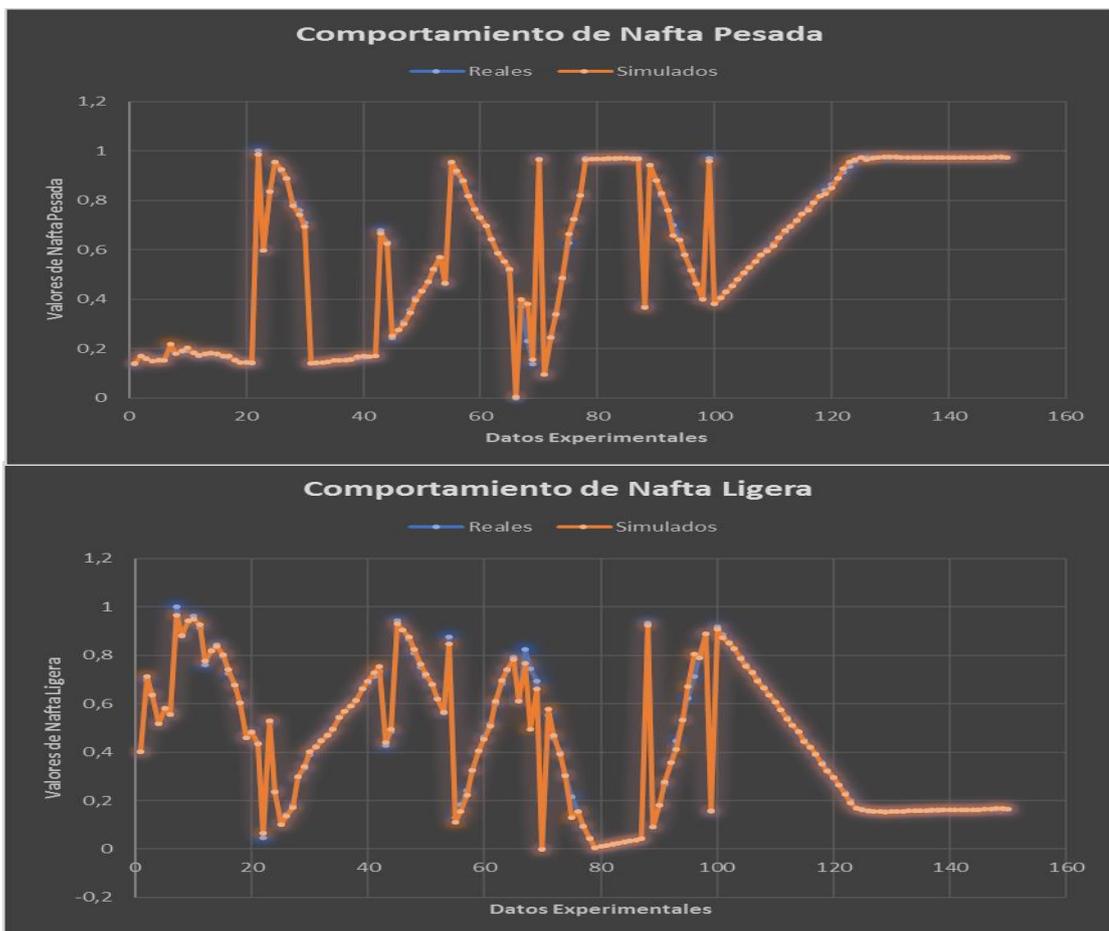


Figura 4-4: Relación de datos simulados y reales

Realizado por: ORTIZ, Edison, 2022.

4.6. Resultados del análisis estadístico

4.6.1. Prueba de Kruskal-Wallis

Para realizar la prueba estadística en cuestión se ordenó los datos de menor a mayor para poder definir los rangos de cada variable, estos valores se pueden apreciar en el anexo C. Seguido del planteamiento de las hipótesis a ser estudiadas dando como respuesta los siguientes resultados:

Tabla 7-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en L.N

NAFTA LIGERA			
Línea		Población	Rango medio
L.N		150	75,2164
L.N Simulado		150	74,7654
H calculado	-0,2109515	H tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 8-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en H.N

NAFTA PESADA			
Línea		Población	Rango medio
H.N		150	75,193
H.N Simulado		150	74,7921
H calculado	-0,1729	H tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 9-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en Q

QUEROSENO			
Línea		Población	Rango medio
Q		150	75,7113
Q Simulado		150	74,2637
H calculado	-0,2169	H tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 10-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en G

GASÓLEO			
Línea		Población	Rango medio
G		150	74,9559
G Simulado		150	75,0025
H calculado	-0,5007	H tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 11-4: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en F.O

FUEL OÍL			
Línea		Población	Rango medio
F.O		150	76,3639
F.O Simulado		150	73,6212
H calculado	0,11225	H tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Se utilizo esta prueba para analizar si acéptanos o rechazamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0)= No existe diferencia entre los valores reales de los predichos por la RNA.

Hipótesis alternativa (H_1)=Existe alguna diferencia entre los valores reales de los predichos por la RNA.

En la utilización de esta prueba se hace una comparación entre el valor de H obtenido estadísticamente con la referencia de H encontrada en tablas en donde si el valor obtenido es H calculado es menor que el valor de H de tablas se acepta la hipótesis nula y si el valor es contrario a esta afirmación se aceptara la hipótesis alternativa por tanto según esto si realiza el análisis de cada prueba realizada a cada flujo obtenido del sistema de fraccionamiento de crudo resulto en la aceptación de la hipótesis nula con un nivel de significancia de 0,05 y con el 95% de confianza se afirma que no existe ninguna diferencia entre los valores resultantes de la predicción por la red neuronal artificial y los datos resultantes de la simulación.

4.6.2. Prueba Friedman

Para poder realizar la prueba de Friedman debemos colocar los rangos en orden de modo que sea fácil asignar los rangos a cada valor en una nueva columna ya con estos rangos se suman los diferentes grados y se obtiene un valor final para cada grupo analizado, hay que aplicar la fórmula de Friedman para poder obtener el valor de X al cuadrado y determinándose como calculo final los grados de libertad que se obtienen restándole 1 al número de grupos analizados, permitiendo al final obtener valores críticos de tablas para poder realizar la comparación y prueba de las hipótesis. Para esta prueba las hipótesis que se utilizaron fueron las mismas que se aplicaron en la anterior prueba, pero con la variación que en esta ocasión el valor calculado estadísticamente debe ser superior al valor estimado en tablas para poder aceptarse la hipótesis nula que en este caso es de 3,4815 con un nivel de confianza del 95%. Por tanto, en las tablas: 12-4, 13-4, 14-4, 15-4, 16-4 se muestran los resultados obtenidos para cada producto resultante, en donde cada valor calculado estadísticamente es superior a los valores de las tablas y por tanto la hipótesis nula es aceptada concluyendo que los datos analizados en cada grupo mantienen un parentesco adecuado entre variables.

Tabla 12-4: Resultados de la prueba Friedman en L.N

NAFTA LIGERA			
Línea		Población	Rango
L.N		150	249
L.N Simulado		150	201
Fr calculado	10938,24	Fr tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 13-4: Resultados de la prueba Friedman en H.N

NAFTA PESADA			
Línea		Población	Rango
H.N		150	213
H.N Simulado		150	237
Fr calculado	10834,56	Fr tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 14-4: Resultados de la prueba Friedman en Q

QUEROSENO			
Línea		Población	Rango
Q		150	263
Q Simulado		150	187
Fr calculado	11146,56	Fr tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 15-4: Resultados de la prueba Friedman en G

GASÓLEO			
Línea		Población	Rango
G		150	224
G Simulado		150	226
Fr calculado	10800,24	Fr tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

Tabla 16-4: Resultados de la prueba Friedman en F.O

FUEL OÍL			
Línea		Población	Rango
F.O		150	241
F.O Simulado		150	209
Fr calculado	10861,44	Fr tablas	3,8415

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

CONCLUSIONES

- ❖ Se realizó la simulación de un sistema de fraccionamiento aplicado en la separación de los componentes presentes en el crudo mediante el software de código libre DWSIM, siendo validado mediante un análisis estadístico entre los resultados obtenidos por la simulación y valores resultantes de una investigación bibliográfica determinándose que existe relación entre los datos experimentales y los datos reales.
- ❖ Se simuló la unidad de fraccionamiento que contiene dos columnas de destilación atmosféricas con un sistema de intercambiadores de calor que aumenta la eficiencia de la unidad ya que los flujos de alimentación son precalentados antes de entrar a los hornos previos a la destilación, para poder predecir las propiedades del crudo se utilizó la herramienta de conversión a pseudocomponentes que utiliza las curvas de destilación experimental para predecir las propiedades del crudo y debido a que existen varios puntos de recirculación es necesario usar bloques que detengan el ciclo de cálculo evitando los bucles infinitos, se realizó 150 simulaciones para obtener un banco de datos experimentales.
- ❖ Se validó el sistema de fraccionamiento de crudo mediante la comparación de los datos obtenidos de la simulación realizada con datos resultantes de investigación previas sobre el tema, obteniéndose un comportamiento similar en los dos casos, pero con discrepancias debido a la naturaleza cambiante del crudo con respecto al lugar donde es encontrado, pero cabe resaltar que el comportamiento de los equipos simulados es idéntico a los parámetros que existen en las investigaciones analizadas.
- ❖ Se diseñó una Red Neuronal Artificial con la capacidad de predecir los valores de los componentes destilados de la unidad de fraccionamiento de crudo, para este fin se utilizó los 150 datos obtenidos de la simulación para el entrenamiento, definiéndose una arquitectura de dos neuronas en la capa de entrada, 3 capas ocultas con 50 neuronas cada una y 6 neuronas en la capa de salida, el tipo de red es Feed-forward backprop y tiene un algoritmo de entrenamiento basado en TRAINLM (Levenberg-Marquardt), obteniéndose un error cuadrático medio de 0,0016801 en el entrenamiento. Siendo validada la RNA mediante pruebas de hipótesis en donde se determinó la correlación existente de los datos predichos y los datos simulados.

RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar un entrenamiento adecuado cuando se esté diseñando una red neuronal artificial debido a que el error más habitual en estos experimentos es de sobrentrenar a la RNA, creándose una red capas de brindar valores precisos solo cuando los datos de entrada se asemejen a los datos de entrenamiento y prediciendo valores atípicos cuando se ingresen valores fuera del rango de datos de entrenamiento. Disminuyendo la capacidad de flexibilidad de datos de la red.
- ❖ Se puede aplicar la RNA creada para comparar los rangos de aprendizaje de cada algoritmo disponible en el software utilizado e incluso se pueden ingresar diferentes valores de entrenamiento y saber el comportamiento del mismo crudo simulado a diferentes condiciones como lo es en columnas de destilación al vacío.
- ❖ Este trabajo puede servir como base para futuras investigaciones debido a que existen muy pocas RNAs sobre procesos en refinerías de petróleo ya que la complejidad de los equipos es elevada, pero de expandirse este tipo de RNA a todas las unidades que existen en una refinería se podría aumentar fácilmente la eficiencia de estos procesos lo que resultaría en mayor productividad y menor tiempo de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE, E. 2013. *Estudio de los principales tipos de Redes Neuronales y las herramientas para su aplicación* . Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana , 2013.

ASTM INTERNATIONAL. 2018. ASTM INTERNATIONAL: Helping our world better. *ASTM D86: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure*. [En línea] ASTM INTERNATIONAL, 25 de Mayo de 2018. [Citado el: 05 de Mayo de 2022.] <https://www.astm.org/Standards/D86>.

BAYOMIE, O, ABDELAZIZ, O & GADALLA, M. 2019. *Exceeding Pinch limits by process configuration of an existing modern crude oil distillation unit: A case study from refining industry*. Egipto : Journal of Cleaner Production, 2019. págs. 1050-1058.

BAZÁN, J; et al 2020. *Red neuronal artificial para estimar un índice de calidad de agua*. Quito : Universidad UTE, 2020. págs. 109-120. 1390-9363.

BENAVIDES, S. 2017. *Simulación de las condiciones de proceso para el despojamiento con gas residual en la columna de destilación del Complejo Industrial Shushufindi*. Quito : UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR: Facultad de Ingeniería Química, 2017.

BERTONA, L. 2005. *Entrenamiento de redes neuronales basado en algoritmos evolutivos* . Argentina : UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES: FACULTAD DE INGENIERÍA, 2005.

BOSOGAIN, X. 2015. *Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones* . Bilbao : Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, 2015.

CAPE-OPEN. 1999: *Experiencias de un esfuerzo de estandarización en industrias químicas*. Jarker, M, y otros. Alemania : s.n.,. págs. 25-35. 0-7803-9935-8.

CASTRO, M; et al. 2007. *El Petróleo en el Ecuador*. Quito : Petroecuador , 2007.

CAUWENBERGHS, G. 1993. *A fast stochastic Error-Descent Algorithm for supervised learning and optimization*. San Mateo : Morgan Kaufmann, 1993.

DÁVILA, S. 2013. *Diseño de un sistema de control neural para el monitoreo y control de calidad en una columna de destilación multicomponentes* . Perú : PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ , 2013.

DE FALCO, I; et al. 1997. *Artificial Neural Networks Optimization by means of Evolutionary Algorithms*. s.l. : Springer Verlag, 1997. 3540762140 .

DIWEB. 2010. DIWEB. *Redes Neuronales* . [En línea] 25 de Febrero de 2010. [Citado el: 28 de Abril de 2022.] <http://avellano.usal.es/~lalonso/RNA/index.htm>.

DWSIM. 2020. DWSIM inforside. *Funciones por plataforma*. [En línea] DWSIM, 5 de Noviembre de 2020. [Citado el: 29 de Abril de 2022.] https://dwsim.inforside.com.br/wiki/index.php?title=Features_by_Platform.

—. **2020.** DWSIM Simulator. *Características*. [En línea] 15 de Noviembre de 2020. [Citado el: 16 de Abril de 2022.] <https://dwsim.inforside.com.br/new/>.

—. **2020.** DWSIM Simulator. *Características*. [En línea] 15 de Noviembre de 2020. <https://dwsim.inforside.com.br/new/>.

—. **2020.** DWSIM Simulator. *Características de CAPE-OPEN*. [En línea] 15 de Noviembre de 2020. <https://dwsim.inforside.com.br/new/>.

YAO, X. 1995. Marcel : Kent, A., J. G. Williams(eds), 1995, En Encyclopedia of Computer Science and Technology, Vol. XXXIII, págs. 137-170.

—. **Yao, X. 1993.** 1993, International Journal of Neural Systems, Vol. IV, págs. 203-222.

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA UTP. 2012. *Principales Tipos de Redes Neuronales* . Peru : UTP, 2012.

FERNÁNDEZ, D. 2007. *Desarrollo de una nueva herramienta basada en redes neuronales para el diseño de protecciones ligeras cerámica-metal frente a impacto de alta velocidad*. Madrid : UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID: DEPARTAMENTO DE MECANICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS, 2007.

FLORES, E, NOVALES, M & VILLASIS, M. 2017. *El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba*. Mexico : Alerg Mex, 2017. págs. 364-370.

FRITSCH, J. 1996. *Modular Neural Networks for Speech Recognition*. Pittsburgh : Carnegie Mellon University, 1996.

GNU. 2007. GNU. *GNU General Public License*. [En línea] GNU, 29 de Junio de 2007. [Citado el: 30 de Abril de 2022.] <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>.

GREEN, D & PERRY, R. 2008. *Petroleum and Complex-Mixture Distillation*. Octava . Mexico : McGraw-Hill, 2008.

GURNEY, K. 1997. *Neural Nets*. s.l. : CRC Press, 1997. 1857285034.

INTERACTIVECHAOS. 2015. InteractiveChaos. *Arquitectura de redes neuronales*. [En línea] 18 de Enero de 2015. [Citado el: 28 de Abril de 2022.] <https://interactivechaos.com/es/manual/tutorial-de-machine-learning/arquitectura-de-redes-neuronales#:~:text=El%20concepto%20de%20arquitectura%20referida,en%20la%20que%20son%20entrenadas..>

ISASI, P & GALVÁN, I. 2004. *Redes Neuronales Artificiales: Un enfoque práctico*. Madrid : Pearson-Prentice Hall, 2004.

LESCANO, C & VÁSQUEZ, V. 2010. *Predicción por redes neuronales artificiales de la calidad fisicoquímica de vinagre de melaza de caña por efecto de tiempo temperatura de alimentación a evaporador-destilador flash*. Perú : Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Agrarias, 2010. págs. 63-73. 2077-9917.

LÓPEZ DE LA MAZA, L; et al. 2018. *Obtención de un modelo neuronal para la estimación de la concentración de etanol en la destilería Héctor Molina*. La Habana : Universidad Tecnológica de La Habana, 2018. 2224-6185.

LÓPEZ, I & PÉREZ, S. 2017. *Redes neuronales de base radial como modelos dinámicos para la puesta en marcha de columnas de destilación por lotes*. Valencia : Universidad de Carabobo, 2017.

MACHADO, D. 2008. Libera tu Radio. *Software Libre en Ecuador*. [En línea] 16 de Noviembre de 2008. [Citado el: 29 de Abril de 2022.] <https://liberaturadio.org/software-libre-en-ecuador-la-necesidad-de-pasar-de/>.

MARTÍNEZ, O & PORRAS, R. 2015. *SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL EN PROCESOS DELSECTOR OIL & GAS A TRAVÉS DEL SOFTWARE ASPEN HYSYS Y*

CONEXIÓN A ROCKWELL AUTOMATION CON EL ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN OPC.
Bogotá : UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS: FACULTAD TECNOLÓGICA , 2015.

MATICH, D. 2001. *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones.* Rosario : Universidad Tecnológica Nacional: Facultad Regional Rosario, 2001.

MINISTERIO DE TELECOMUNICACIONES Y DE LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN. 2020. Gobierno Electronico. *Software libre y Software Público.* [En línea] Gobierno Ecuatoriano, 18 de Marzo de 2020. [Citado el: 29 de Abril de 2022.] <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/software-libre-y-software-publico-2/>.

MINISTERIO DE TELECOMUNICACIONES Y DE LA SOCIEDAD. 2018. *Plan Nacional de Gobierno Electrónico 2018-2022.* Quito : República del Ecuador, 2018.

MORALES, J, PALMA, T & MARÍN, R. 2008. *Inteligencia Artificial, Técnicas, Métodos y Aplicaciones.* España : McGRAW, 2008.

NASCIMENTO, C. 1994. *Artificial Neural Networks in Control and Optimization.* Manchester : University of Manchester, Institute of Science and Technology (UMIST), Control Systems Centre, 1994.

OSORIO, I. 2015. *Control óptimo de la concentración de dióxido de carbono de una columna de absorción empacada mediante un modelo de red neuronal artificial .* Huancayo : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, 2015.

PAZ, A. 2013. *Balance de Materia en unidades simples y múltiples con ayuda computacional .* México D.F. : UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO , 2013.

PETROECUADOR. 2013. *El petróleo en el Ecuador la nueva era petrolera .* Quito : Manthra Comunicación integral y Producción editorial, 2013.

PINOS, R. 2008. *Texto Básico de Procesos Orgánicos.* Riobamba : Arce Digital, 2008.

PROGSOFT. 2020. ProgSoft.net. *DWSIM .* [En línea] ProgSoft.net, 24 de Enero de 2020. [Citado el: 30 de Abril de 2022.] <https://progsoft.net/es/software/dwsim>.

SÁNCHEZ, R, FERNANDEZ, M & NOLASCO, S. 2015. *APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) EN LA PREDICCIÓN Y MODELADO DE LA CINÉTICA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CANOLA.* Buenos Aires : Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aries, 2015. págs. 3-12.

SARANGO, M. 2016. *Las fluctuaciones del precio del petróleo y su impacto en el crecimiento económico del Ecuador, periodo, 2000 – 2014.* 2016. pág. 7.

SERRANO, A, SORIA, E & MARTÍN, J. 2010. *Redes Neuronales Artificiales .* Valencia : Universidad de Valencia , 2010.

SIEGEL, S & CASTELLAN, N. 1988. *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences.* New York : McGraw-Hill, 1988.

SOZEN, A, ARCAKILIOGLU, E & OZALP, M. 2004. *Chemical Engineering and Processing.* Londres : Prentice Hall, 2004.

SUN, K; et al. 2016. *Development of soft sensor with neural network and nonlinear variable selection for crude distillation unit process.* Slovenia : Proceedings of the 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2016. págs. 338-342.

TOSELLI, L; et al. 2009. *Aplicación del Simulador ChemCAD™ en la Enseñanza en Carreras de Ingeniería.* Argentina : s.n., 2009. págs. 19-24.

VALLES, H. 2006. *A neural network method to predict activity coefficients for binary systems based on molecular functional group contribution.* Puerto Rico : Universidad de Puerto Rico, 2006.

YELA, S. 2009. *Framework for operability assessment of production facilities: an application to a primary unit of a crude oil refinery.* Louisiana : Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2009. Tesis de Maestría.

ZUMALACÁRREGUI, L; et al. 2018. *Modelación del equilibrio líquido-vapor a presión constante de mezclas etanol-agua utilizando redes neuronales artificiales.* La Habana : Universidad de Oriente, 2018. 2224-6185.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS EXPERIMENTALES

Fc (Kg/h)	T (°C)	L.N (Gas) (Kg/h)	L.N (Kg/h)	H.N (Kg/h)	Q (Kg/h)	G (Kg/h)	F.O (Kg/h)
200000	500	93827,4	280543	415717	292519	254531	551688
300000	475	87009,8	335385	421344	295493	267640	557640
280000	480	88373,3	324416	420228	294898	265018	556449
240000	490	91100,4	302479	417968	293709	259775	554069
260000	485	89736,9	313448	419093	294303	262397	555259
252000	487	90282,3	309060	418643	294065	261348	554783
400000	450	80192,2	390228	426971	298468	280750	563592
360000	460	82919,3	368291	424720	297278	275506	561211
380000	455	81555,8	379260	425846	297873	278128	562402
388000	453	81010,4	383647	426296	298111	279177	562878
372000	457	82101,2	374872	425395	297635	277079	561926
320000	470	85646,3	346354	422469	296088	270262	558830
340000	465	84282,8	357323	423594	296683	272884	560021
348000	463	83737,4	361711	424045	296921	273933	560497
332000	467	84828,2	352936	423144	296445	271835	559544
308000	473	86464,4	339773	421794	295731	268689	442689
292000	477	87555,2	330997	420893	295255	266591	557164
268000	483	89191,4	317835	419543	294541	263444	555735
220000	495	92463,9	291511	416842	293114	257153	552878
228000	493	91918,5	295898	417292	293352	258201	553354
212000	497	93009,3	287124	416392	292876	256104	552402
500000	400	94166,9	215867	584232	337539	319007	584786
450000	425	87179,5	303048	505601	318003	299879	574189
480000	410	91371,9	250739	552779	329725	311356	580547
494000	403	93328,4	226329	574796	335195	316711,7	583514
490000	405	92769,4	233303	568505	333632	315182	582666
486000	407	92210,4	240277	562214	332069	313652	581818
474000	413	90533,4	261200	543343	327381	309060	579275
470000	415	89974,4	268174	537052	325818	307530	578427
464000	418	89135,9	278636	527616	323474	305235	577156
208000	498	93281,9	284930	416167	292757	255580	552164
216000	496	92736,5	289318	416617,3	292994	256628	552640
224000	494	92191,1	293705	417067,5	293233	257677	553117
232000	492	91645,7	298093	417518	293471	258726	553593
248000	488	90554,9	306867	418418	293947	260824	554545
256000	486	90009,5	311254,8	418868	294184	261872	555021
264000	484	89464,1	315642	419318	294422	262921	555497
272000	482	88918,7	320029	419768	294661	263969	555973

288000	478	87827,9	328804	420669	295136	266067	556925
296000	476	87282,5	333192	421119	295375	267116	557402
304000	474	86737,1	337579	421569	295613	268165	557878
312000	472	86191,7	341967	422019	295850	269213	558354
460000	420	88576,9	285611	521326	321910	303704	576308
454000	423	87738,5	296073	511891	319566	301409	575037
406000	447	81030,6	379766	436406	300812	283045	564864
410000	445	81589,5	372792	442696	302374	284575	565711
414000	443	82148,5	365818	448987	303937	286105	566559
420000	440	82987,1	355356	458422	306281	288400	567830
426000	437	83825,5	344894	467857	308625	290695	569101
430000	435	84384,5	337920	474148	310188	292226	569950
434000	433	84943,6	330945	480439	311751	293757	570798
440000	430	85782,1	320484	489875	314096	296053	573069
446000	427	86620,5	310022	499310	316440	298349	573341
365543	370	78632,8	367562	479273	286355	270530	504276
486554	397	92613,5	231036	573736	332421	314159	576735
477591	395	91577,8	241150	566739	329008	310928	571368
468627	393	90542,2	251262	559742	325596	307696	566000
455181	390	88988,8	266432	549246	320478	302848	557949
441753	387	87435,3	281602	538750	315359	298000	549898
432772	385	86399,8	291715	531753	311947	294769	544531
423807	383	85364,2	301828	524755	308535	291537	539164
410362	380	83810,8	316997	514259	303416	286689	531112
396916	377	82257,4	332167	503763	298297	281841	523062
387953	375	81221,8	342279	496766	294886	278610	517694
378989	373	80186,2	352393	489769	291473	275378	512327
583334	360	64749,9	319500	388928	236162	223340	400471
409101	368	75856,2	357949	461204	276316	261092	483515
474439	365	71681,3	343531	434100	261259	246935	452374
517997	363	68914,7	333918	416032	251220	237497	431613
30000	340	94214,6	207183	577634	337379	318968	584826
528000	358	67696,3	308268	407798	246284	232903	418907
445000	355	72116,1	291421	436104	261466	247247	446560
389667	353	75062,5	280189	454975	271588	256810	464995
306667	350	79482,2	263342	483281	286771	271154	492648
223667	347	83901,9	246494	511587	301953	285498	520302
168334	345	86848,4	235262	530458	312075	295061	538737
113000	343	89794,9	224030	549328	322197	304624	557173
50000	320	94166,9	215867	578522	337420	318979	584907
32000	338	94209,8	208051	577723	337383	318969	584834
34000	336	94205,1	208919	577812	337387	318970	584842
36000	334	94200,2	209788	577900	337391	318971	584850
38000	332	94195,5	210656	577989	337395	318972	584858
40000	330	94190,7	211525	578078	337400	318974	584867

42000	328	94185,9	212393	578166	337404	318975	584875
44000	326	94181,2	213262	578256	337408	318976	584883
46000	324	94176,4	214130	578344	337412	318977	584891
48000	322	94171,6	214999	578433	337416	318978	584899
450000	300	78431,7	378005	461326	283441	268442	489354
70000	319	93380,1	223974	572662	334721	316452	580129
110000	317	91806,6	240187	560942	329323	311398	570574
150000	315	90233,1	256401	549223	323925	306345	561017
190000	313	88659,5	272615	537503	318527	301291	551463
230000	311	87086,1	288829	525784	313130	296237	541908
270000	309	85512,5	305042	514064	307732	291183	532353
310000	307	83939,1	321256	502344	302333	286130	522797
350000	305	82365,5	337471	490625	296936	281076	513242
390000	303	80791,9	353684	478905	291538	276023	503687
430000	301	79218,4	369898	467186	286140	270979	494132
95000	250	94059,5	235302	578734	337449	318986	584967
442900	299	78744,3	375151	463674	284521	269453	491266
428700	297	79369,4	369443	468371	286682	271475	495091
414500	295	79994,5	363735	473066	288842	273496	498915
400300	293	80619,6	358027	477763	291002	275518	502740
386100	291	81244,7	352316	482459	293162	277539	506564
371900	289	81869,8	346610	487155	295323	279562	510389
357700	287	82494,9	340902	491852	297483	281583	514213
343500	285	83120,1	335194	496548	299643	283605	518038
329300	283	83745,1	329486	501244	301804	285627	521862
315100	281	84370,3	323778	505941	303964	287649	525686
300900	279	84995,4	318069	510637	306124	289671	529512
286700	277	85620,5	312362	515333	308284	291692	533336
272500	275	86245,6	306653	520030	310445	293714	537160
258300	273	86870,7	300945	524726	312605	295736	540985
244100	271	87495,8	295237	529423	314766	297758	544809
229900	269	88120,9	289529	534119	316926	299779	548634
215700	267	88746,1	283821	538815	319086	301801	552459
201500	265	89371,2	278113	543512	321247	303823	556283
187300	263	89996,3	272405	548208	323407	305845	560108
173100	261	90621,4	266696	552904	325567	307866	563932
158900	259	91246,5	260989	557600	327728	309888	567757
144700	257	91871,6	255280	562296	329887	311909	571581
130500	255	92496,7	249572	566993	332048	313931	575406
116300	253	93121,8	243864	571690	334209	315953	579230
102100	251	93746,9	238156	576385	336369	317975	583055
100000	200	94047,8	237459	579262	337467	318991	585007
95100	249	94059,3	235345	578747	337449	318986	584968
95300	247	94058,8	235431	578766	337450	318986	584969
95500	245	94058,3	235518	578787	337451	318987	584971

95700	243	94057,9	235604	578807	337452	318987	584973
95900	241	94057,4	235690	578829	337452	318987	584974
96100	239	94056,9	235777	578850	337453	318987,1	584976
96300	237	94056,5	235863	578871	337454	318987,3	584977
96500	235	94055,9	235949	578892	337454	318988	584979
96700	233	94055,5	236035	578914	337455	318988	584980
96900	231	94055,1	236122	578935	337456	318988,1	584982
97100	229	94054,6	236207	578956	337457	318988,3	584984
97300	227	94054,1	236294	578977	337457,3	318988,3	584985
97500	225	94053,7	236381	578998	337458	318988,5	584987
97700	223	94053,1	236466	579019	337459	318988,7	584989
97900	221	94052,7	236553	579040	337459,4	318988,9	584990
98100	219	94052,3	236639	579061	337460	318989,1	584992
98300	217	94051,7	236726	579083	337461	318989,3	584993
98500	215	94051,3	236812	579104	337462	318989,5	584995
98700	213	94050,8	236898	579124	337462,3	318989,7	584996
98900	211	94050,4	236985	579146	337463	318989,9	584998
99100	209	94049,9	237071	579167	337464	318990,1	584999
99300	207	94049,4	237157	579188	337465	318990,3	585001
99500	205	94048,9	237243	579209	337465,2	318990,5	585003
99700	203	94048,5	237329	579230	337465,9	318990,7	585004
99900	201	94048,1	237415	579251	337466,6	318990,9	585006

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

ANEXO B: COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y REALES

#	L.N (Kg/h)	L.N Simulado (Kg/h)	% Error	H.N (Kg/h)	H.N Simulado (Kg/h)	% Error
1	0,400775766	0,40214517	0,34169	0,137165649	0,1393141	1,56632
2	0,700385151	0,71198665	1,65645	0,165977143	0,16953417	2,14308
3	0,640459996	0,63584614	0,72040	0,160211772	0,1594813	0,45594
4	0,520615149	0,51826837	0,45077	0,148691271	0,14857549	0,07787
5	0,580540304	0,57995107	0,10150	0,154451522	0,15365943	0,51284
6	0,556568057	0,55529309	0,22908	0,152147421	0,15332744	0,77558
7	1	0,96587786	3,41221	0,194788637	0,21733945	11,57707
8	0,880155153	0,88217048	0,22897	0,183263016	0,180568	1,47057
9	0,940080308	0,94272866	0,28172	0,189028387	0,19187512	1,50598
10	0,964047092	0,95073558	1,38079	0,191332487	0,20468895	6,98076
11	0,916108061	0,92641764	1,12537	0,186719166	0,18290968	2,04022
12	0,760310306	0,77567101	2,02032	0,171737394	0,17475068	1,75459
13	0,820235461	0,8179477	0,27892	0,177497645	0,18033334	1,59760
14	0,844207708	0,83829793	0,70004	0,179806865	0,18134918	0,85776
15	0,796268677	0,80206817	0,72833	0,175193544	0,17864999	1,97293
16	0,724357398	0,74097531	2,29416	0,168281244	0,16929329	0,60140
17	0,676412904	0,67732849	0,13536	0,163667923	0,17019246	3,98645
18	0,604507088	0,60337813	0,18676	0,156755622	0,15312786	2,31428
19	0,460695457	0,4584614	0,48493	0,1429259	0,1433122	0,27028
20	0,484662242	0,4826439	0,41644	0,14523	0,14444687	0,53924
21	0,436728673	0,43410338	0,60113	0,1406218	0,14186602	0,88480
22	0,047441886	0,06691865	41,05393	1	0,98593198	1,40680
23	0,523723675	0,52902466	1,01217	0,597391758	0,59761067	0,03665
24	0,237952416	0,23491002	1,27857	0,838953631	0,83378113	0,61654
25	0,10459723	0,10216613	2,32425	0,951685577	0,95445702	0,29121
26	0,142697151	0,13486474	5,48884	0,919474256	0,92446395	0,54267
27	0,180797072	0,17260357	4,53188	0,887262934	0,88991872	0,29932
28	0,295102297	0,29931839	1,42869	0,790639209	0,7776774	1,63941
29	0,333202218	0,34139216	2,45795	0,758427887	0,74249507	2,10077
30	0,390357562	0,40160518	2,88136	0,710113464	0,69447554	2,20227
31	0,42474255	0,42256503	0,51267	0,13946975	0,14095127	1,06225
32	0,448714797	0,4461822	0,56441	0,141775386	0,14267774	0,63647
33	0,472681581	0,47065752	0,42821	0,14408051	0,14383456	0,17070
34	0,496653828	0,49447119	0,43947	0,146387171	0,14538697	0,68326
35	0,544587397	0,54283267	0,32221	0,150995371	0,15217773	0,78304
36	0,568558551	0,56771098	0,14907	0,153299472	0,15379333	0,32215
37	0,592526428	0,59187891	0,10928	0,155603572	0,15325906	1,50672
38	0,616493212	0,6144017	0,33926	0,157907672	0,15387304	2,55506
39	0,664432243	0,66125068	0,47884	0,162520993	0,16786799	3,29004

40	0,688404491	0,69486192	0,93803	0,164825093	0,17043797	3,40536
41	0,712371275	0,72738094	2,10700	0,167129193	0,16887858	1,04673
42	0,736343522	0,75334821	2,30934	0,169433294	0,17076446	0,78566
43	0,428462946	0,4395845	2,59569	0,677907263	0,66541668	1,84252
44	0,485618291	0,49384875	1,69484	0,62959796	0,62454269	0,80294
45	0,942844656	0,93168816	1,18328	0,24309794	0,25274925	3,97013
46	0,904744735	0,90591737	0,12961	0,275304141	0,27612358	0,29765
47	0,866644814	0,87660593	1,14939	0,307515463	0,30110322	2,08518
48	0,80948947	0,82493599	1,90818	0,355824765	0,34439606	3,21189
49	0,752334125	0,76506117	1,69167	0,404134068	0,39579105	2,06442
50	0,714234205	0,7226212	1,17426	0,43634539	0,43306493	0,75180
51	0,676128821	0,68023143	0,60678	0,468556712	0,47054739	0,42485
52	0,61897894	0,61986898	0,14379	0,516871134	0,52325027	1,23418
53	0,561823595	0,56437173	0,45355	0,565180437	0,56958644	0,77957
54	0,876172526	0,84630932	3,40837	0,462586532	0,46398951	0,30329
55	0,130312218	0,10901643	16,34212	0,946258141	0,95408933	0,82760
56	0,185566391	0,15669399	15,55907	0,910431942	0,91997032	1,04768
57	0,240809637	0,22127022	8,11405	0,874605743	0,87979539	0,59337
58	0,323685433	0,32420706	0,16115	0,820863884	0,81780763	0,37232
59	0,406561228	0,40540551	0,28427	0,767122025	0,76176427	0,69842
60	0,461809937	0,45376541	1,74196	0,731295826	0,7285388	0,37701
61	0,517058647	0,50847313	1,66045	0,695464507	0,6965012	0,14906
62	0,599928979	0,60864978	1,45364	0,641722648	0,64329235	0,24461
63	0,682804775	0,69796802	2,22073	0,587980789	0,58454276	0,58472
64	0,738048021	0,73997954	0,26171	0,55215459	0,55138767	0,13890
65	0,793302193	0,78224408	1,39393	0,516328391	0,52230638	1,15779
66	0,613603212	0,60927351	0,70562	0	0,00608015	0,56333
67	0,823655385	0,76730802	6,84113	0,370069225	0,3982964	7,62754
68	0,744887869	0,49419752	33,65478	0,231290706	0,3815053	64,94623
69	0,692370729	0,66223395	4,35269	0,13877852	0,15427896	11,16919
70	0	-0,0011013	0,00500	0,96621677	0,96571117	0,05233
71	0,552241252	0,57949245	4,93465	0,096618605	0,0950972	1,57465
72	0,460203775	0,47074928	2,29149	0,241551632	0,24647373	2,03770
73	0,398841815	0,39379652	1,26499	0,338175357	0,33832712	0,04488
74	0,306804338	0,30355138	1,06027	0,483108385	0,48596263	0,59081
75	0,214761397	0,13035032	39,30459	0,628041412	0,66492407	5,87265
76	0,153399437	0,15433539	0,61014	0,724665137	0,72475131	0,01189
77	0,092037477	0,09328241	1,35264	0,821283742	0,82056639	0,08735
78	0,047441886	0,04413242	6,97582	0,970763528	0,96472336	0,62221
79	0,004742003	0,00571377	20,49284	0,96667247	0,9671068	0,04493
80	0,009484007	0,0105812	11,56889	0,967128169	0,96804905	0,09522
81	0,014231473	0,01477081	3,78975	0,967578749	0,9688025	0,12648
82	0,018973476	0,01905929	0,45227	0,968034449	0,96941822	0,14295
83	0,023720943	0,02374499	0,10139	0,968490149	0,96980911	0,13619
84	0,028462946	0,02873577	0,95853	0,968940728	0,96983833	0,09264

85	0,033210413	0,03368483	1,42853	0,969401548	0,96938413	0,00180
86	0,037952416	0,0381458	0,50955	0,969852128	0,96837396	0,15241
87	0,042699883	0,04171506	2,30639	0,970307828	0,96679961	0,36156
88	0,933224071	0,92547207	0,83067	0,370693893	0,36451734	1,66621
89	0,091731541	0,09174067	0,00995	0,940759022	0,94239223	0,17361
90	0,180305389	0,18088711	0,32263	0,88075001	0,8797773	0,11044
91	0,2688847	0,27675081	2,92546	0,820746119	0,82937347	1,05116
92	0,357464012	0,35657433	0,24889	0,760737107	0,76123307	0,06520
93	0,446043323	0,41202205	7,62735	0,700733216	0,65736424	6,18909
94	0,534617171	0,53479222	0,03274	0,640724204	0,63971668	0,15725
95	0,623196482	0,6724698	7,90655	0,580715193	0,57976044	0,16441
96	0,711781256	0,80416329	12,97899	0,520711301	0,51537671	1,02448
97	0,800355104	0,79115346	1,14969	0,46070229	0,46170874	0,21846
98	0,888934415	0,88902953	0,01070	0,400698398	0,39876758	0,48186
99	0,153617963	0,15937437	3,74723	0,971849015	0,95894728	1,32755
100	0,917632276	0,90827142	1,02011	0,382716176	0,37979328	0,76372
101	0,886448687	0,87310309	1,50551	0,406765862	0,40572479	0,25594
102	0,855265099	0,85090195	0,51015	0,430805309	0,42814834	0,61674
103	0,82408151	0,82697332	0,35091	0,454854995	0,45309176	0,38765
104	0,792881532	0,78661831	0,78993	0,478899562	0,47930444	0,08454
105	0,761708869	0,75365134	1,05782	0,502944128	0,5060613	0,61979
106	0,730525281	0,72918745	0,18313	0,526993815	0,52822866	0,23432
107	0,699341692	0,69436178	0,71209	0,551038381	0,55092275	0,02098
108	0,668158103	0,66509361	0,45865	0,575082948	0,57914248	0,70590
109	0,636974514	0,63595053	0,16076	0,599132634	0,59590323	0,53901
110	0,605785463	0,60645313	0,11022	0,623177201	0,61597079	1,15640
111	0,574607337	0,57411959	0,08488	0,647221767	0,64987699	0,41025
112	0,543418285	0,53732404	1,12146	0,671271454	0,67898393	1,14893
113	0,512234696	0,51115435	0,21091	0,69531602	0,69389923	0,20376
114	0,481051108	0,4837973	0,57087	0,719365707	0,71882037	0,07581
115	0,449867519	0,44507608	1,06508	0,743410273	0,74462412	0,16328
116	0,41868393	0,42208334	0,81193	0,76745484	0,75862705	1,15027
117	0,387500341	0,39281808	1,37232	0,791504526	0,7903437	0,14666
118	0,356316753	0,3516758	1,30248	0,815549093	0,81736321	0,22244
119	0,325127701	0,32207276	0,93961	0,839593659	0,82733326	1,46028
120	0,293949575	0,29638894	0,82986	0,863638226	0,85147595	1,40826
121	0,262760523	0,26313414	0,14219	0,887682792	0,88776003	0,00870
122	0,231576935	0,2243961	3,10084	0,911732479	0,92687994	1,66139
123	0,200393346	0,19045541	4,95921	0,935782165	0,95673064	2,23861
124	0,169209757	0,16733314	1,10905	0,959821611	0,96458624	0,49641
125	0,16540195	0,16265981	1,65787	0,974552493	0,97325257	0,13339
126	0,153852878	0,15762792	2,45367	0,971915578	0,96314468	0,90243
127	0,154322708	0,15510627	0,50774	0,972012862	0,96940577	0,26822
128	0,154798	0,1538089	0,63896	0,972120387	0,97319621	0,11067
129	0,15526783	0,15352441	1,12285	0,972222791	0,97501845	0,28755

130	0,15573766	0,15396746	1,13666	0,972335436	0,97540709	0,31590
131	0,156212953	0,15484892	0,87319	0,972442961	0,97489175	0,25182
132	0,156682783	0,15592494	0,48368	0,972550485	0,97395389	0,14430
133	0,157152613	0,15702055	0,08404	0,97265801	0,97298532	0,03365
134	0,157622443	0,15803131	0,25940	0,972770655	0,9722584	0,05266
135	0,158097736	0,1589098	0,51365	0,97287818	0,97191429	0,09908
136	0,158562102	0,15964456	0,68267	0,972985704	0,97197056	0,10433
137	0,159037395	0,1602381	0,75498	0,973093229	0,97234477	0,07692
138	0,159512688	0,16068961	0,73783	0,973200754	0,9728896	0,03197
139	0,159977055	0,1609877	0,63174	0,973308278	0,97343447	0,01297
140	0,160452348	0,16111766	0,41465	0,973415803	0,97382934	0,04248
141	0,160922178	0,16108573	0,10163	0,973523328	0,97398571	0,04750
142	0,161397471	0,1609556	0,27378	0,973635973	0,97390729	0,02787
143	0,1618673	0,16087982	0,61005	0,973743497	0,97369924	0,00455
144	0,16233713	0,16109384	0,76587	0,973845902	0,97354238	0,03117
145	0,162812423	0,16183864	0,59810	0,973958547	0,97362493	0,03425
146	0,163282253	0,16320889	0,04493	0,974066071	0,97404364	0,00230
147	0,163752083	0,16498261	0,75146	0,974173596	0,97471281	0,05535
148	0,164221913	0,16653015	1,40556	0,974281121	0,97532803	0,10745
149	0,164691742	0,16687249	1,32414	0,974388645	0,97540494	0,10430
150	0,165161572	0,16487399	0,17412	0,97449617	0,97436866	0,01308
Error Promedio (%)			0,272686278	Error Promedio (%)		0,70860

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

#	Q (Kg/h)	Q Simulado (Kg/h)	% Error	G (Kg/h)	G Simulado (Kg/h)	% Error
1	0,55591505	0,55642247	0,09128	0,326037192	0,33001551	1,22020
2	0,585251092	0,57998822	0,89925	0,463064589	0,45662003	1,39172
3	0,579381911	0,57318682	1,06926	0,435657019	0,44421308	1,96394
4	0,567653413	0,56578371	0,32937	0,380852332	0,38759686	1,77090
5	0,57351273	0,57198675	0,26608	0,408259902	0,41025755	0,48931
6	0,571165057	0,5700387	0,19720	0,397294783	0,40063425	0,84055
7	0,614596999	0,61152109	0,50048	0,600102439	0,59217483	1,32104
8	0,602858637	0,60402061	0,19274	0,545287299	0,54313242	0,39518
9	0,608727818	0,60076117	1,30874	0,572694869	0,57497133	0,39750
10	0,61107549	0,60282991	1,34936	0,583659987	0,5843897	0,12502
11	0,606380145	0,60265129	0,61494	0,56172975	0,56375342	0,36026
12	0,591120274	0,58919061	0,32644	0,490472159	0,49307752	0,53119
13	0,596989455	0,59438074	0,43698	0,517879729	0,51171589	1,19021
14	0,599337128	0,59858707	0,12515	0,528844847	0,52218414	1,25948
15	0,594641783	0,59183576	0,47189	0,50691461	0,50438417	0,49918
16	0,587598765	0,58223628	0,91261	0,474029707	0,47090707	0,65874
17	0,58290342	0,57952173	0,58015	0,45209947	0,45256749	0,10352

18	0,575860402	0,57154835	0,74880	0,419204114	0,42267625	0,82827
19	0,561784231	0,5610333	0,13367	0,353444762	0,35339753	0,01336
20	0,564131904	0,56366579	0,08263	0,364399427	0,36861836	1,15778
21	0,559436559	0,55766847	0,31605	0,342479643	0,34070915	0,51696
22	1	0,97985165	2,01483	1	0,9856583	1,43417
23	0,807293568	0,80182897	0,67690	0,800056446	0,79230013	0,96947
24	0,922921373	0,91457081	0,90480	0,920024669	0,92113663	0,12086
25	0,976878385	0,97197235	0,50222	0,976007401	0,97751909	0,15488
26	0,961460686	0,9586287	0,29455	0,960017561	0,96549064	0,57010
27	0,946042988	0,94189005	0,43898	0,944024585	0,9496611	0,59707
28	0,899799757	0,88814486	1,29528	0,896024753	0,89026282	0,64306
29	0,884382059	0,87188779	1,41277	0,880031777	0,87014105	1,12391
30	0,861260444	0,84955225	1,35942	0,856042313	0,84251794	1,57987
31	0,558262722	0,5565251	0,31125	0,33700231	0,3361051	0,26623
32	0,560600531	0,55928897	0,23396	0,347956976	0,34652061	0,41280
33	0,562958067	0,56255685	0,07127	0,358922094	0,36094974	0,56493
34	0,56530574	0,56439962	0,16029	0,369887213	0,37583495	1,60799
35	0,570001085	0,56845119	0,27191	0,39181745	0,39642536	1,17603
36	0,572338893	0,57132248	0,17759	0,402772116	0,40516727	0,59467
37	0,574686566	0,57196901	0,47288	0,413737234	0,41606985	0,56379
38	0,577044103	0,57126795	1,00099	0,4246919	0,42994925	1,23792
39	0,581729584	0,57792434	0,65413	0,446622137	0,45183463	1,16709
40	0,58408712	0,57999384	0,70080	0,457587256	0,45344632	0,90495
41	0,586434793	0,580553	1,00297	0,468552374	0,46276728	1,23467
42	0,588772601	0,58473328	0,68606	0,47950704	0,47942539	0,01703
43	0,845832881	0,83568191	1,20012	0,840038885	0,82630151	1,63533
44	0,822711266	0,81550391	0,87605	0,816049421	0,80506805	1,34567
45	0,637718615	0,63681242	0,14210	0,624091902	0,61839442	0,91292
46	0,653126449	0,65175951	0,20929	0,640084878	0,63486118	0,81609
47	0,668544147	0,6656315	0,43567	0,656077853	0,6509872	0,77592
48	0,691665762	0,68583008	0,84371	0,680067317	0,67552443	0,66800
49	0,714787378	0,70723401	1,05673	0,70405678	0,70128683	0,39343
50	0,730205076	0,72279149	1,01527	0,720060209	0,71889305	0,16209
51	0,745622774	0,73921278	0,85968	0,736063637	0,73610123	0,00511
52	0,768754254	0,76411082	0,60402	0,760063554	0,75958496	0,06297
53	0,791875869	0,78746554	0,55695	0,78406347	0,77977934	0,54640
54	0,495112304	0,48411744	2,22068	0,493273543	0,50499183	2,37562
55	0,949515176	0,96074791	1,18300	0,949324218	0,94600579	0,34956
56	0,915848763	0,92812172	1,34006	0,915550817	0,91007301	0,59831
57	0,882192213	0,88707886	0,55392	0,881766962	0,87277261	1,02004
58	0,831707389	0,82549728	0,74667	0,831091181	0,82177225	1,12129
59	0,781212701	0,77399709	0,92364	0,780415399	0,77811877	0,29428
60	0,747556152	0,74262435	0,65972	0,746641998	0,74953117	0,38696
61	0,713899602	0,70871643	0,72604	0,712858143	0,71784299	0,69928
62	0,663404914	0,64729329	2,42863	0,662182362	0,66342459	0,18760

63	0,612910226	0,58717749	4,19845	0,61150658	0,61582419	0,70606
64	0,579263541	0,55841731	3,59875	0,577733179	0,58987001	2,10077
65	0,545597128	0,53338301	2,23867	0,543949324	0,55854576	2,68342
66	0	0,00261459	0,05765	0	-0,0020849	0,04578
67	0,396085897	0,40155467	1,38070	0,394618834	0,39248179	0,54155
68	0,247561084	0,39390625	59,11477	0,246636771	0,44216843	79,27920
69	0,148534677	0,14179658	4,53638	0,147982063	0,15506807	4,78842
70	0,998421733	0,99969498	0,12753	0,999592336	0,99663931	0,29542
71	0,099845133	0,10192473	2,08282	0,099961324	0,10138665	1,42587
72	0,249602967	0,24109593	3,40823	0,249898084	0,25822869	3,33360
73	0,3494481	0,34320156	1,78754	0,349859408	0,36817926	5,23635
74	0,499215798	0,49310818	1,22344	0,499796168	0,50521369	1,08395
75	0,648973633	0,58931017	9,19351	0,649732928	0,59872962	7,84989
76	0,748818766	0,74710526	0,22883	0,749694252	0,75054788	0,11386
77	0,848663898	0,84663306	0,23930	0,849655576	0,84996367	0,03626
78	0,998826164	1,00650283	0,76857	0,999707318	1,0039466	0,42405
79	0,998461189	0,99880598	0,03453	0,999602789	0,99881518	0,07879
80	0,998500646	0,99891786	0,04178	0,999613242	1,00063688	0,10240
81	0,998540103	0,99900604	0,04666	0,999623695	1,00160519	0,19822
82	0,998579559	0,99852568	0,00540	0,999634148	1,00154002	0,19066
83	0,99862888	0,99748264	0,11478	0,999655053	1,00062867	0,09740
84	0,998668337	0,99636184	0,23096	0,999665506	0,99937632	0,02893
85	0,998707794	0,99594728	0,27641	0,999675959	0,99847356	0,12028
86	0,99874725	0,99708906	0,16603	0,999686412	0,99861959	0,10672
87	0,998786707	1,00048058	0,16959	0,999696865	1,00035399	0,06573
88	0,466368111	0,45520844	2,39289	0,471447835	0,4833639	2,52755
89	0,972202768	0,97167933	0,05384	0,973292776	0,97274803	0,05597
90	0,918955976	0,92143378	0,26963	0,920463692	0,92107625	0,06655
91	0,865709185	0,8699392	0,48862	0,86764506	0,88197579	1,65168
92	0,812462393	0,81208855	0,04601	0,814815976	0,8146108	0,02518
93	0,759225465	0,72497822	4,51081	0,761986892	0,78136482	2,54308
94	0,705978674	0,70733471	0,19208	0,709157808	0,70794044	0,17166
95	0,652722018	0,62959335	3,54342	0,656339177	0,60358332	8,03790
96	0,59948509	0,57398719	4,25330	0,603510092	0,48407161	19,79064
97	0,546238299	0,5470872	0,15541	0,550691461	0,54979189	0,16335
98	0,492991507	0,48840723	0,92989	0,497966906	0,49954978	0,31787
99	0,999112225	0,99410262	0,50141	0,999780489	0,99832832	0,14525
100	0,477021415	0,47535636	0,34905	0,482015742	0,490503	1,76078
101	0,498337887	0,50064912	0,46379	0,503151557	0,50777832	0,91956
102	0,519644495	0,51639637	0,62507	0,524276919	0,52361194	0,12684
103	0,540951103	0,53373585	1,33381	0,545412734	0,54324328	0,39776
104	0,562257711	0,556948	0,94436	0,566538096	0,57821336	2,06081
105	0,583574183	0,58178123	0,30724	0,587684363	0,60919894	3,66091
106	0,604880792	0,6035352	0,22246	0,608809725	0,61116006	0,38605
107	0,6261874	0,62338061	0,44823	0,62994554	0,62897424	0,15419

108	0,647503872	0,64825014	0,11525	0,651081355	0,65466254	0,55004
109	0,66881048	0,66837321	0,06538	0,67221717	0,67028819	0,28696
110	0,690117088	0,68464214	0,79334	0,693352985	0,6895788	0,54434
111	0,711423696	0,70872639	0,37914	0,714478347	0,71636345	0,26384
112	0,732740168	0,73650417	0,51369	0,735614162	0,73993778	0,58776
113	0,754046776	0,75393875	0,01433	0,756749976	0,75755011	0,10573
114	0,775363248	0,77424969	0,14362	0,777885791	0,77894934	0,13672
115	0,796669856	0,79739014	0,09041	0,799011153	0,79774533	0,15842
116	0,817976464	0,81319741	0,58425	0,820146968	0,8171465	0,36585
117	0,839292936	0,8356325	0,43613	0,841282783	0,84511902	0,45600
118	0,860599544	0,8611217	0,06067	0,862418598	0,8612594	0,13441
119	0,881906152	0,89258905	1,21134	0,88354396	0,87820888	0,60383
120	0,903222624	0,91346056	1,13349	0,904679775	0,90138782	0,36388
121	0,924519368	0,92474226	0,02411	0,925805137	0,92491958	0,09565
122	0,94583584	0,9455255	0,03281	0,946940951	0,94909093	0,22705
123	0,967152313	0,97201496	0,50278	0,968076766	0,9713881	0,34205
124	0,988458921	0,98986561	0,14231	0,989212581	0,99005184	0,08484
125	0,99928978	1,00059871	0,13099	0,999832753	1,0026408	0,28085
126	0,999112225	0,99561761	0,34977	0,999780489	0,99923905	0,05416
127	0,999122089	0,99808793	0,10351	0,999780489	1,0004077	0,06273
128	0,999131953	0,99967128	0,05398	0,999790941	1,00086668	0,10760
129	0,999141817	1,00037769	0,12369	0,999790941	1,00083949	0,10488
130	0,999141817	1,00037255	0,12318	0,999790941	1,00053475	0,07440
131	0,999151681	0,9999104	0,07594	0,999791987	1,00011936	0,03274
132	0,999161546	0,99926649	0,01050	0,999794077	0,99971297	0,00811
133	0,999161546	0,99867806	0,04839	0,999801394	0,99939263	0,04088
134	0,99917141	0,99830524	0,08669	0,999801394	0,99920015	0,06014
135	0,999181274	0,9982156	0,09665	0,99980244	0,99914928	0,06533
136	0,999191138	0,99839105	0,08007	0,99980453	0,99923234	0,05723
137	0,999194097	0,99875139	0,04431	0,99980453	0,99942628	0,03783
138	0,999201002	0,9991871	0,00139	0,999806621	0,99969774	0,01089
139	0,999210866	0,99959296	0,03824	0,999808711	1,00000562	0,01969
140	0,999214812	0,99989376	0,06795	0,999810802	1,00030045	0,04897
141	0,999220731	1,0000546	0,08345	0,999812893	1,00052089	0,07081
142	0,999230595	1,00007167	0,08417	0,999814983	1,00059204	0,07772
143	0,999240459	0,99994855	0,07086	0,999817074	1,00043424	0,06173
144	0,999243418	0,9996749	0,04318	0,999819164	0,99999211	0,01730
145	0,999250323	0,99923252	0,00178	0,999821255	0,99928474	0,05366
146	0,999260187	0,99864209	0,06186	0,999823346	0,9984581	0,13655
147	0,999270051	0,99803157	0,12394	0,999825436	0,9978048	0,20220
148	0,999272024	0,99767799	0,15952	0,999827527	0,99772575	0,21021
149	0,999278929	0,99798171	0,12982	0,999829617	0,99864441	0,11854
150	0,999285834	0,99937614	0,00904	0,999831708	1,00091741	0,10859
Error Promedio (%)			0,15409	Error Promedio (%)		0,50068

ANEXO C: DATOS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO
LNS	0,0033	LN	0	H.N	0	HNS	0,0033
LNS	0,01	LN	0,0066	H.N	0,01	HNS	0,0066
LNS	0,0167	LN	0,0133	H.N	0,0133	HNS	0,02
LNS	0,0234	LN	0,02	H.N	0,0167	HNS	0,0301
LNS	0,0301	LN	0,0267	H.N	0,0234	HNS	0,0367
LNS	0,0367	LN	0,0334	H.N	0,0267	HNS	0,0401
LNS	0,0434	LN	0,0401	H.N	0,0334	HNS	0,0468
LNS	0,0501	LN	0,0468	H.N	0,0434	HNS	0,0501
LNS	0,0568	LN	0,0535	H.N	0,0535	HNS	0,0568
LNS	0,0602	LN	0,0635	H.N	0,0602	HNS	0,0635
LNS	0,0668	LN	0,0702	H.N	0,0668	HNS	0,0702
LNS	0,0769	LN	0,0702	H.N	0,0735	HNS	0,0836
LNS	0,0836	LN	0,0802	H.N	0,0769	HNS	0,0869
LNS	0,0903	LN	0,0869	H.N	0,0802	HNS	0,0903
LNS	0,0936	LN	0,0969	H.N	0,0936	HNS	0,0969
LNS	0,1003	LN	0,1036	H.N	0,1137	HNS	0,1003
LNS	0,107	LN	0,1137	H.N	0,117	HNS	0,1036
LNS	0,1103	LN	0,117	H.N	0,1204	HNS	0,107
LNS	0,1204	LN	0,1237	H.N	0,1237	HNS	0,1103
LNS	0,127	LN	0,1304	H.N	0,1304	HNS	0,127
LNS	0,1337	LN	0,1371	H.N	0,1337	HNS	0,1505
LNS	0,1404	LN	0,1438	H.N	0,1371	HNS	0,1571
LNS	0,1471	LN	0,1538	H.N	0,1404	HNS	0,1605
LNS	0,1505	LN	0,1571	H.N	0,1438	HNS	0,1672
LNS	0,1605	LN	0,1638	H.N	0,1471	HNS	0,1705
LNS	0,1705	LN	0,1672	H.N	0,1538	HNS	0,1739
LNS	0,1739	LN	0,1772	H.N	0,1638	HNS	0,1772
LNS	0,1839	LN	0,1806	H.N	0,1806	HNS	0,1839
LNS	0,1872	LN	0,1906	H.N	0,1872	HNS	0,1939
LNS	0,1973	LN	0,1939	H.N	0,1906	HNS	0,2006
LNS	0,204	LN	0,2006	H.N	0,1973	HNS	0,204
LNS	0,2107	LN	0,2073	H.N	0,214	HNS	0,2073
LNS	0,2173	LN	0,214	H.N	0,2173	HNS	0,2107
LNS	0,224	LN	0,2207	H.N	0,2207	HNS	0,2274
LNS	0,2274	LN	0,2307	H.N	0,224	HNS	0,2341
LNS	0,2341	LN	0,2508	H.N	0,2307	HNS	0,2374
LNS	0,2374	LN	0,2575	H.N	0,2408	HNS	0,2508
LNS	0,2408	LN	0,2608	H.N	0,2441	HNS	0,2541
LNS	0,2441	LN	0,2675	H.N	0,2474	HNS	0,2608
LNS	0,2474	LN	0,2742	H.N	0,2575	HNS	0,2642
LNS	0,2541	LN	0,2775	H.N	0,2675	HNS	0,2742

LNS	0,2642	LN	0,2809	H.N	0,2709	HNS	0,2775
LNS	0,2709	LN	0,2842	H.N	0,2809	HNS	0,2842
LNS	0,2876	LN	0,2943	H.N	0,2876	HNS	0,2943
LNS	0,2909	LN	0,2976	H.N	0,2909	HNS	0,2976
LNS	0,301	LN	0,311	H.N	0,301	HNS	0,3043
LNS	0,3043	LN	0,3177	H.N	0,3143	HNS	0,3076
LNS	0,3076	LN	0,321	H.N	0,3177	HNS	0,311
LNS	0,3143	LN	0,3277	H.N	0,3244	HNS	0,321
LNS	0,3244	LN	0,3344	H.N	0,3311	HNS	0,3277
LNS	0,3311	LN	0,3377	H.N	0,3377	HNS	0,3344
LNS	0,3411	LN	0,3478	H.N	0,3444	HNS	0,3411
LNS	0,3444	LN	0,3545	H.N	0,3478	HNS	0,3511
LNS	0,3511	LN	0,3578	H.N	0,3545	HNS	0,3578
LNS	0,3645	LN	0,3612	H.N	0,3612	HNS	0,3645
LNS	0,3712	LN	0,3678	H.N	0,3678	HNS	0,3712
LNS	0,3812	LN	0,3745	H.N	0,3745	HNS	0,3779
LNS	0,3846	LN	0,3779	H.N	0,3812	HNS	0,3846
LNS	0,3879	LN	0,3913	H.N	0,3913	HNS	0,3879
LNS	0,3946	LN	0,3979	H.N	0,3946	HNS	0,4013
LNS	0,4013	LN	0,4046	H.N	0,3979	HNS	0,4046
LNS	0,4113	LN	0,408	H.N	0,408	HNS	0,4113
LNS	0,4147	LN	0,418	H.N	0,418	HNS	0,4147
LNS	0,4214	LN	0,4247	H.N	0,4247	HNS	0,4214
LNS	0,4347	LN	0,428	H.N	0,428	HNS	0,4314
LNS	0,4381	LN	0,4314	H.N	0,4347	HNS	0,4381
LNS	0,4481	LN	0,4414	H.N	0,4448	HNS	0,4414
LNS	0,4515	LN	0,4448	H.N	0,4515	HNS	0,4481
LNS	0,4548	LN	0,4581	H.N	0,4581	HNS	0,4548
LNS	0,4615	LN	0,4648	H.N	0,4648	HNS	0,4615
LNS	0,4682	LN	0,4749	H.N	0,4715	HNS	0,4682
LNS	0,4715	LN	0,4782	H.N	0,4782	HNS	0,4749
LNS	0,4816	LN	0,4849	H.N	0,4816	HNS	0,4849
LNS	0,4882	LN	0,4949	H.N	0,4882	HNS	0,4949
LNS	0,4916	LN	0,5016	H.N	0,4916	HNS	0,5016
LNS	0,4983	LN	0,505	H.N	0,4983	HNS	0,505
LNS	0,5083	LN	0,515	H.N	0,515	HNS	0,5083
LNS	0,5117	LN	0,5183	H.N	0,5183	HNS	0,5117
LNS	0,525	LN	0,5217	H.N	0,5317	HNS	0,5217
LNS	0,5284	LN	0,5317	H.N	0,5351	HNS	0,525
LNS	0,5384	LN	0,5351	H.N	0,5418	HNS	0,5284
LNS	0,5418	LN	0,5451	H.N	0,5451	HNS	0,5384
LNS	0,5518	LN	0,5484	H.N	0,5518	HNS	0,5484
LNS	0,5551	LN	0,5618	H.N	0,5551	HNS	0,5585
LNS	0,5585	LN	0,5719	H.N	0,5652	HNS	0,5618
LNS	0,5652	LN	0,5752	H.N	0,5719	HNS	0,5685

LNS	0,5685	LN	0,5819	H.N	0,5785	HNS	0,5752
LNS	0,5785	LN	0,5852	H.N	0,5852	HNS	0,5819
LNS	0,5886	LN	0,5919	H.N	0,5953	HNS	0,5886
LNS	0,5953	LN	0,6053	H.N	0,5986	HNS	0,5919
LNS	0,5986	LN	0,6086	H.N	0,6086	HNS	0,602
LNS	0,602	LN	0,612	H.N	0,612	HNS	0,6053
LNS	0,6153	LN	0,6187	H.N	0,6153	HNS	0,6187
LNS	0,6254	LN	0,622	H.N	0,6287	HNS	0,622
LNS	0,6287	LN	0,6321	H.N	0,6321	HNS	0,6254
LNS	0,6354	LN	0,6387	H.N	0,6354	HNS	0,6387
LNS	0,6421	LN	0,6488	H.N	0,6488	HNS	0,6421
LNS	0,6454	LN	0,6555	H.N	0,6521	HNS	0,6454
LNS	0,6521	LN	0,6588	H.N	0,6588	HNS	0,6555
LNS	0,6622	LN	0,6655	H.N	0,6622	HNS	0,6655
LNS	0,6722	LN	0,6688	H.N	0,6722	HNS	0,6688
LNS	0,6755	LN	0,6822	H.N	0,6755	HNS	0,6822
LNS	0,6789	LN	0,6889	H.N	0,6789	HNS	0,6856
LNS	0,6856	LN	0,6923	H.N	0,6889	HNS	0,6989
LNS	0,6956	LN	0,6989	H.N	0,6923	HNS	0,7023
LNS	0,7023	LN	0,709	H.N	0,6956	HNS	0,7056
LNS	0,7056	LN	0,7123	H.N	0,709	HNS	0,7157
LNS	0,7157	LN	0,7224	H.N	0,7123	HNS	0,7257
LNS	0,719	LN	0,729	H.N	0,719	HNS	0,729
LNS	0,7257	LN	0,7357	H.N	0,7224	HNS	0,7324
LNS	0,7324	LN	0,7391	H.N	0,7391	HNS	0,7357
LNS	0,7424	LN	0,7491	H.N	0,7558	HNS	0,7424
LNS	0,7458	LN	0,7525	H.N	0,7591	HNS	0,7458
LNS	0,7591	LN	0,7558	H.N	0,7692	HNS	0,7491
LNS	0,7625	LN	0,7692	H.N	0,7725	HNS	0,7525
LNS	0,7658	LN	0,7725	H.N	0,7759	HNS	0,7625
LNS	0,7792	LN	0,7759	H.N	0,7859	HNS	0,7658
LNS	0,7892	LN	0,7826	H.N	0,7926	HNS	0,7792
LNS	0,7959	LN	0,7859	H.N	0,7993	HNS	0,7826
LNS	0,7993	LN	0,7926	H.N	0,816	HNS	0,7892
LNS	0,8127	LN	0,8026	H.N	0,8193	HNS	0,7959
LNS	0,816	LN	0,806	H.N	0,8227	HNS	0,8026
LNS	0,826	LN	0,8093	H.N	0,826	HNS	0,806
LNS	0,8294	LN	0,8193	H.N	0,8327	HNS	0,8093
LNS	0,8394	LN	0,8227	H.N	0,8394	HNS	0,8127
LNS	0,8428	LN	0,8327	H.N	0,8428	HNS	0,8294
LNS	0,8461	LN	0,8361	H.N	0,8461	HNS	0,8361
LNS	0,8494	LN	0,8595	H.N	0,8528	HNS	0,8494
LNS	0,8528	LN	0,8628	H.N	0,8595	HNS	0,8561
LNS	0,8561	LN	0,8662	H.N	0,8628	HNS	0,8762
LNS	0,8729	LN	0,8695	H.N	0,8662	HNS	0,8795

LNS	0,8762	LN	0,8795	H.N	0,8695	HNS	0,8896
LNS	0,8829	LN	0,8862	H.N	0,8729	HNS	0,8963
LNS	0,8963	LN	0,8896	H.N	0,8829	HNS	0,9063
LNS	0,8996	LN	0,8929	H.N	0,8862	HNS	0,913
LNS	0,903	LN	0,9063	H.N	0,8929	HNS	0,9163
LNS	0,9096	LN	0,9163	H.N	0,8996	HNS	0,923
LNS	0,913	LN	0,9197	H.N	0,903	HNS	0,9297
LNS	0,923	LN	0,9264	H.N	0,9096	HNS	0,9364
LNS	0,9297	LN	0,9331	H.N	0,9197	HNS	0,9397
LNS	0,9364	LN	0,9397	H.N	0,9264	HNS	0,9464
LNS	0,9464	LN	0,9431	H.N	0,9331	HNS	0,9498
LNS	0,9531	LN	0,9498	H.N	0,9431	HNS	0,9632
LNS	0,9565	LN	0,9598	H.N	0,9531	HNS	0,9765
LNS	0,9665	LN	0,9632	H.N	0,9565	HNS	0,9799
LNS	0,9698	LN	0,9765	H.N	0,9598	HNS	0,9832
LNS	0,9732	LN	0,9799	H.N	0,9665	HNS	0,9866
LNS	0,9832	LN	0,9866	H.N	0,9698	HNS	0,9899
LNS	0,9899	LN	0,9933	H.N	0,9732	HNS	0,9933
LNS	0,9966	LN	1	H.N	1	HNS	0,9966
SUMA	74,7654	SUMA	75,2164	SUMA	74,7921	SUMA	75,193

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO
Q	0	QS	0,0033	G	0	G.S	0,0033
Q	0,0066	QS	0,01	G	0,0066	G.S	0,01
Q	0,0167	QS	0,0133	G	0,0133	G.S	0,0167
Q	0,0234	QS	0,02	G	0,02	G.S	0,0267
Q	0,0267	QS	0,0301	G	0,0234	G.S	0,0334
Q	0,0334	QS	0,0367	G	0,0301	G.S	0,0367
Q	0,0401	QS	0,0434	G	0,0401	G.S	0,0434
Q	0,0501	QS	0,0468	G	0,0468	G.S	0,0501
Q	0,0568	QS	0,0535	G	0,0535	G.S	0,0602
Q	0,0668	QS	0,0602	G	0,0568	G.S	0,0702
Q	0,0735	QS	0,0635	G	0,0635	G.S	0,0769
Q	0,0769	QS	0,0702	G	0,0668	G.S	0,0802
Q	0,0802	QS	0,0836	G	0,0735	G.S	0,0869
Q	0,0903	QS	0,0869	G	0,0836	G.S	0,0936
Q	0,1003	QS	0,0936	G	0,0903	G.S	0,1003
Q	0,1036	QS	0,0969	G	0,0969	G.S	0,107
Q	0,107	QS	0,1103	G	0,1036	G.S	0,1137
Q	0,1137	QS	0,117	G	0,1103	G.S	0,1204
Q	0,1304	QS	0,1204	G	0,117	G.S	0,127
Q	0,1404	QS	0,1237	G	0,1237	G.S	0,1337
Q	0,1438	QS	0,127	G	0,1304	G.S	0,1404

Q	0,1505	QS	0,1337	G	0,1371	G.S	0,1471
Q	0,1538	QS	0,1371	G	0,1438	G.S	0,1538
Q	0,1605	QS	0,1471	G	0,1505	G.S	0,1571
Q	0,1672	QS	0,1571	G	0,1605	G.S	0,1638
Q	0,1739	QS	0,1638	G	0,1672	G.S	0,1705
Q	0,1806	QS	0,1705	G	0,1806	G.S	0,1739
Q	0,1872	QS	0,1772	G	0,1872	G.S	0,1772
Q	0,1939	QS	0,1839	G	0,1906	G.S	0,1839
Q	0,214	QS	0,1906	G	0,1973	G.S	0,1939
Q	0,2207	QS	0,1973	G	0,2006	G.S	0,204
Q	0,2274	QS	0,2006	G	0,2073	G.S	0,214
Q	0,2307	QS	0,204	G	0,2107	G.S	0,2173
Q	0,2341	QS	0,2073	G	0,2207	G.S	0,224
Q	0,2408	QS	0,2107	G	0,2307	G.S	0,2274
Q	0,2441	QS	0,2173	G	0,2341	G.S	0,2374
Q	0,2608	QS	0,224	G	0,2408	G.S	0,2474
Q	0,2709	QS	0,2374	G	0,2441	G.S	0,2508
Q	0,2742	QS	0,2474	G	0,2575	G.S	0,2541
Q	0,2775	QS	0,2508	G	0,2675	G.S	0,2608
Q	0,2842	QS	0,2541	G	0,2775	G.S	0,2642
Q	0,2876	QS	0,2575	G	0,2809	G.S	0,2709
Q	0,2943	QS	0,2642	G	0,2909	G.S	0,2742
Q	0,2976	QS	0,2675	G	0,2943	G.S	0,2842
Q	0,3076	QS	0,2809	G	0,2976	G.S	0,2876
Q	0,3177	QS	0,2909	G	0,3043	G.S	0,301
Q	0,321	QS	0,301	G	0,311	G.S	0,3076
Q	0,3277	QS	0,3043	G	0,3177	G.S	0,3143
Q	0,3311	QS	0,311	G	0,321	G.S	0,3244
Q	0,3444	QS	0,3143	G	0,3277	G.S	0,3311
Q	0,3545	QS	0,3244	G	0,3344	G.S	0,3377
Q	0,3578	QS	0,3344	G	0,3411	G.S	0,3444
Q	0,3612	QS	0,3377	G	0,3545	G.S	0,3478
Q	0,3645	QS	0,3411	G	0,3578	G.S	0,3511
Q	0,3712	QS	0,3478	G	0,3645	G.S	0,3612
Q	0,3745	QS	0,3511	G	0,3745	G.S	0,3678
Q	0,3812	QS	0,3678	G	0,3846	G.S	0,3712
Q	0,3913	QS	0,3779	G	0,3913	G.S	0,3779
Q	0,3979	QS	0,3846	G	0,3979	G.S	0,3812
Q	0,4046	QS	0,3879	G	0,4013	G.S	0,3879
Q	0,4113	QS	0,3946	G	0,408	G.S	0,3946
Q	0,4147	QS	0,4013	G	0,4147	G.S	0,4046
Q	0,418	QS	0,408	G	0,418	G.S	0,4113
Q	0,428	QS	0,4214	G	0,4214	G.S	0,4247
Q	0,4314	QS	0,4247	G	0,4314	G.S	0,428
Q	0,4414	QS	0,4347	G	0,4381	G.S	0,4347

Q	0,4448	QS	0,4381	G	0,4448	G.S	0,4414
Q	0,4481	QS	0,4515	G	0,4515	G.S	0,4481
Q	0,4648	QS	0,4548	G	0,4581	G.S	0,4548
Q	0,4682	QS	0,4581	G	0,4615	G.S	0,4682
Q	0,4715	QS	0,4615	G	0,4648	G.S	0,4715
Q	0,4816	QS	0,4749	G	0,4782	G.S	0,4749
Q	0,4849	QS	0,4782	G	0,4816	G.S	0,4882
Q	0,4983	QS	0,4882	G	0,4849	G.S	0,4916
Q	0,505	QS	0,4916	G	0,4949	G.S	0,4983
Q	0,5083	QS	0,4949	G	0,5016	G.S	0,505
Q	0,515	QS	0,5016	G	0,5083	G.S	0,5117
Q	0,5183	QS	0,5117	G	0,5183	G.S	0,515
Q	0,525	QS	0,5217	G	0,5217	G.S	0,5284
Q	0,5351	QS	0,5284	G	0,525	G.S	0,5317
Q	0,5384	QS	0,5317	G	0,5384	G.S	0,5351
Q	0,5451	QS	0,5418	G	0,5451	G.S	0,5418
Q	0,5484	QS	0,5518	G	0,5551	G.S	0,5484
Q	0,5585	QS	0,5551	G	0,5585	G.S	0,5518
Q	0,5652	QS	0,5618	G	0,5685	G.S	0,5618
Q	0,5752	QS	0,5685	G	0,5719	G.S	0,5652
Q	0,5785	QS	0,5719	G	0,5785	G.S	0,5752
Q	0,5852	QS	0,5819	G	0,5886	G.S	0,5819
Q	0,5953	QS	0,5886	G	0,5919	G.S	0,5852
Q	0,5986	QS	0,5919	G	0,5953	G.S	0,5986
Q	0,6053	QS	0,602	G	0,6053	G.S	0,602
Q	0,612	QS	0,6086	G	0,612	G.S	0,6086
Q	0,6187	QS	0,6153	G	0,6187	G.S	0,6153
Q	0,622	QS	0,6254	G	0,622	G.S	0,6254
Q	0,6321	QS	0,6287	G	0,6354	G.S	0,6287
Q	0,6354	QS	0,6421	G	0,6387	G.S	0,6321
Q	0,6387	QS	0,6454	G	0,6454	G.S	0,6421
Q	0,6521	QS	0,6488	G	0,6521	G.S	0,6488
Q	0,6555	QS	0,6588	G	0,6588	G.S	0,6555
Q	0,6655	QS	0,6622	G	0,6655	G.S	0,6622
Q	0,6688	QS	0,6722	G	0,6688	G.S	0,6755
Q	0,6755	QS	0,6822	G	0,6722	G.S	0,6789
Q	0,6789	QS	0,6856	G	0,6856	G.S	0,6822
Q	0,6956	QS	0,6889	G	0,6889	G.S	0,6923
Q	0,6989	QS	0,6923	G	0,6956	G.S	0,6989
Q	0,7023	QS	0,7056	G	0,7023	G.S	0,7056
Q	0,7123	QS	0,709	G	0,709	G.S	0,7123
Q	0,7157	QS	0,719	G	0,7157	G.S	0,719
Q	0,729	QS	0,7224	G	0,7257	G.S	0,7224
Q	0,7324	QS	0,7257	G	0,729	G.S	0,7324
Q	0,7391	QS	0,7357	G	0,7391	G.S	0,7357

Q	0,7892	QS	0,7424	G	0,8026	G.S	0,7424
Q	0,7926	QS	0,7458	G	0,806	G.S	0,7458
Q	0,7959	QS	0,7491	G	0,8093	G.S	0,7491
Q	0,8026	QS	0,7525	G	0,8127	G.S	0,7525
Q	0,806	QS	0,7558	G	0,816	G.S	0,7558
Q	0,8093	QS	0,7591	G	0,8193	G.S	0,7591
Q	0,816	QS	0,7625	G	0,8227	G.S	0,7625
Q	0,8227	QS	0,7658	G	0,826	G.S	0,7658
Q	0,826	QS	0,7692	G	0,8294	G.S	0,7692
Q	0,8327	QS	0,7725	G	0,8327	G.S	0,7725
Q	0,8394	QS	0,7759	G	0,8394	G.S	0,7759
Q	0,8494	QS	0,7792	G	0,8461	G.S	0,7792
Q	0,8494	QS	0,7826	G	0,8461	G.S	0,7826
Q	0,8561	QS	0,7859	G	0,8461	G.S	0,7859
Q	0,8595	QS	0,7993	G	0,8561	G.S	0,7892
Q	0,8628	QS	0,8127	G	0,8561	G.S	0,7926
Q	0,8628	QS	0,8193	G	0,8561	G.S	0,7959
Q	0,8695	QS	0,8294	G	0,8662	G.S	0,7993
Q	0,8729	QS	0,8361	G	0,8695	G.S	0,8361
Q	0,8729	QS	0,8428	G	0,8729	G.S	0,8428
Q	0,8795	QS	0,8461	G	0,8729	G.S	0,9364
Q	0,8829	QS	0,8862	G	0,8795	G.S	0,9431
Q	0,8896	QS	0,913	G	0,8829	G.S	0,9464
Q	0,8929	QS	0,9297	G	0,8829	G.S	0,9498
Q	0,8963	QS	0,9498	G	0,8896	G.S	0,9531
Q	0,8996	QS	0,9531	G	0,8929	G.S	0,9565
Q	0,903	QS	0,9565	G	0,8963	G.S	0,9598
Q	0,9063	QS	0,9598	G	0,8996	G.S	0,9632
Q	0,9096	QS	0,9632	G	0,903	G.S	0,9665
Q	0,9163	QS	0,9665	G	0,9063	G.S	0,9698
Q	0,9197	QS	0,9698	G	0,9096	G.S	0,9732
Q	0,923	QS	0,9732	G	0,913	G.S	0,9765
Q	0,9264	QS	0,9799	G	0,9163	G.S	0,9799
Q	0,9331	QS	0,9832	G	0,9197	G.S	0,9832
Q	0,9364	QS	0,9866	G	0,923	G.S	0,9866
Q	0,9397	QS	0,9899	G	0,9264	G.S	0,9899
Q	0,9431	QS	0,9933	G	0,9297	G.S	0,9933
Q	0,9464	QS	0,9966	G	0,9331	G.S	0,9966
Q	0,9765	QS	1	G	0,9397	G.S	1
SUMA	75,7113	SUMA	74,2637	SUMA	74,9559	SUMA	75,0025

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

GRUPO	RANGO	GRUPO	RANGO
F.O	0	F.O.S	0,0033

F.O	0,0066	F.O.S	0,01
F.O	0,0133	F.O.S	0,0167
F.O	0,02	F.O.S	0,0267
F.O	0,0234	F.O.S	0,0334
F.O	0,0301	F.O.S	0,0401
F.O	0,0367	F.O.S	0,0468
F.O	0,0434	F.O.S	0,0501
F.O	0,0535	F.O.S	0,0568
F.O	0,0602	F.O.S	0,0635
F.O	0,0668	F.O.S	0,0702
F.O	0,0735	F.O.S	0,0769
F.O	0,0836	F.O.S	0,0802
F.O	0,0869	F.O.S	0,0903
F.O	0,0936	F.O.S	0,0969
F.O	0,1036	F.O.S	0,1003
F.O	0,107	F.O.S	0,1103
F.O	0,1137	F.O.S	0,117
F.O	0,127	F.O.S	0,1204
F.O	0,1304	F.O.S	0,1237
F.O	0,1337	F.O.S	0,1404
F.O	0,1371	F.O.S	0,1438
F.O	0,1471	F.O.S	0,1538
F.O	0,1505	F.O.S	0,1571
F.O	0,1638	F.O.S	0,1605
F.O	0,1739	F.O.S	0,1672
F.O	0,1806	F.O.S	0,1705
F.O	0,1839	F.O.S	0,1772
F.O	0,1906	F.O.S	0,1872
F.O	0,204	F.O.S	0,1939
F.O	0,2107	F.O.S	0,1973
F.O	0,2207	F.O.S	0,2006
F.O	0,224	F.O.S	0,2073
F.O	0,2374	F.O.S	0,214
F.O	0,2474	F.O.S	0,2173
F.O	0,2508	F.O.S	0,2274
F.O	0,2575	F.O.S	0,2307
F.O	0,2642	F.O.S	0,2341
F.O	0,2709	F.O.S	0,2408
F.O	0,2775	F.O.S	0,2441
F.O	0,2876	F.O.S	0,2541
F.O	0,2943	F.O.S	0,2608
F.O	0,301	F.O.S	0,2675
F.O	0,3043	F.O.S	0,2742
F.O	0,3076	F.O.S	0,2809
F.O	0,3143	F.O.S	0,2842

F.O	0,3177	F.O.S	0,2909
F.O	0,3244	F.O.S	0,2976
F.O	0,3277	F.O.S	0,311
F.O	0,3377	F.O.S	0,321
F.O	0,3478	F.O.S	0,3311
F.O	0,3745	F.O.S	0,3344
F.O	0,3812	F.O.S	0,3411
F.O	0,3846	F.O.S	0,3444
F.O	0,3879	F.O.S	0,3511
F.O	0,3946	F.O.S	0,3545
F.O	0,3979	F.O.S	0,3578
F.O	0,4046	F.O.S	0,3612
F.O	0,408	F.O.S	0,3645
F.O	0,4113	F.O.S	0,3678
F.O	0,4214	F.O.S	0,3712
F.O	0,4247	F.O.S	0,3779
F.O	0,428	F.O.S	0,3913
F.O	0,4347	F.O.S	0,4013
F.O	0,4381	F.O.S	0,4147
F.O	0,4448	F.O.S	0,418
F.O	0,4515	F.O.S	0,4314
F.O	0,4548	F.O.S	0,4414
F.O	0,4581	F.O.S	0,4481
F.O	0,4648	F.O.S	0,4615
F.O	0,4682	F.O.S	0,4715
F.O	0,4749	F.O.S	0,4816
F.O	0,4782	F.O.S	0,4882
F.O	0,4849	F.O.S	0,4983
F.O	0,4916	F.O.S	0,5083
F.O	0,4949	F.O.S	0,5117
F.O	0,5016	F.O.S	0,525
F.O	0,505	F.O.S	0,5317
F.O	0,515	F.O.S	0,5351
F.O	0,5183	F.O.S	0,5384
F.O	0,5217	F.O.S	0,5418
F.O	0,5284	F.O.S	0,5484
F.O	0,5451	F.O.S	0,5585
F.O	0,5518	F.O.S	0,5652
F.O	0,5551	F.O.S	0,5685
F.O	0,5618	F.O.S	0,5719
F.O	0,5752	F.O.S	0,5819
F.O	0,5785	F.O.S	0,5852
F.O	0,5886	F.O.S	0,5919
F.O	0,5953	F.O.S	0,5986
F.O	0,602	F.O.S	0,6086

F.O	0,6053	F.O.S	0,6153
F.O	0,612	F.O.S	0,622
F.O	0,6187	F.O.S	0,6321
F.O	0,6254	F.O.S	0,6354
F.O	0,6287	F.O.S	0,6421
F.O	0,6387	F.O.S	0,6454
F.O	0,6555	F.O.S	0,6488
F.O	0,6588	F.O.S	0,6521
F.O	0,6688	F.O.S	0,6622
F.O	0,6755	F.O.S	0,6655
F.O	0,6822	F.O.S	0,6722
F.O	0,6856	F.O.S	0,6789
F.O	0,6923	F.O.S	0,6889
F.O	0,6956	F.O.S	0,7023
F.O	0,6989	F.O.S	0,709
F.O	0,7056	F.O.S	0,7123
F.O	0,719	F.O.S	0,7157
F.O	0,7224	F.O.S	0,729
F.O	0,7257	F.O.S	0,7357
F.O	0,7324	F.O.S	0,7391
F.O	0,7826	F.O.S	0,7424
F.O	0,8026	F.O.S	0,7458
F.O	0,806	F.O.S	0,7491
F.O	0,8127	F.O.S	0,7525
F.O	0,8193	F.O.S	0,7558
F.O	0,8227	F.O.S	0,7591
F.O	0,8361	F.O.S	0,7625
F.O	0,8428	F.O.S	0,7658
F.O	0,8461	F.O.S	0,7692
F.O	0,8528	F.O.S	0,7725
F.O	0,8595	F.O.S	0,7759
F.O	0,8628	F.O.S	0,7792
F.O	0,8795	F.O.S	0,7859
F.O	0,8829	F.O.S	0,7892
F.O	0,8862	F.O.S	0,7926
F.O	0,8896	F.O.S	0,7959
F.O	0,8929	F.O.S	0,7993
F.O	0,8963	F.O.S	0,8093
F.O	0,8996	F.O.S	0,816
F.O	0,903	F.O.S	0,826
F.O	0,9063	F.O.S	0,8294
F.O	0,9096	F.O.S	0,8327
F.O	0,913	F.O.S	0,8394
F.O	0,9163	F.O.S	0,8494
F.O	0,9197	F.O.S	0,8561

F.O	0,9264	F.O.S	0,8662
F.O	0,9297	F.O.S	0,8695
F.O	0,9331	F.O.S	0,8729
F.O	0,9397	F.O.S	0,8762
F.O	0,9431	F.O.S	0,923
F.O	0,9464	F.O.S	0,9364
F.O	0,9498	F.O.S	0,9765
F.O	0,9531	F.O.S	0,9799
F.O	0,9565	F.O.S	0,9832
F.O	0,9598	F.O.S	0,9866
F.O	0,9632	F.O.S	0,9899
F.O	0,9665	F.O.S	0,9933
F.O	0,9698	F.O.S	0,9966
F.O	0,9732	F.O.S	1
SUMA	76,3639	SUMA	73,6212

Realizado por: ORTIZ, Edison 2022.

ANEXO D: CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE NORMATIVA



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 20 / 01 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Edison Alexander Ortiz Villegas</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.01.20 10:54:45 -05'00'



2122-DBRA-UTP-2021