



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN PROCESO DE
DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL POR ABSORCIÓN
EMPLEANDO TRIETILENGLICOL”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: BRYAN ALEXANDER JARAMILLO SOZA

DIRECTOR: Ing. DANIEL ANTONIO CHUQUIN VASCO Msc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, **Bryan Alexander Jaramillo Soza**

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, Bryan Alexander Jaramillo Soza, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 22 de febrero de 2021

Bryan Aleander Jaramillo Soza

CI: 140094236-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo Propuesta Tecnológica, **SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL POR ABSORCIÓN EMPLEANDO TRIETILENGLICOL**, realizado por el señor: **BRYAN ALEXANDER JARAMILLO SOZA**, 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. Raúl Leandro Dávalos Monteiro PhD. _____ 2021-09-06
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco MsC. _____ 2021-09-06
**DIRECTOR DE TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy Mgs. _____ 2021-09-06
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

Con mucha alegría dedico este trabajo a mi madre Sandra y a mi tía María, quienes me han apoyado a lo largo de toda mi vida con sus consejos y enseñanzas. A mi hermana y primo que siempre han estado conmigo para ayudarme. Para todos ellos hago y dedico este trabajo.

Bryan

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida, por haberme dado la fuerza y la garra necesaria para no rendirme en los momentos más difíciles.

Gracias a mi madre Sandra y a mi tía María por todo su apoyo moral, emocional y económico, por siempre guiarme de la forma correcta. Ambas me enseñaron que la mejor herencia que me pueden dar es la educación y la perseverancia de nunca rendirme.

Agradezco a mis maestros Daniel, Paúl, Jenny, Tony, Sabino, que considero son los mejores docentes de mi carrera.

A mis amigos los “mmv” y a los “lagartijos” con quienes nunca faltaron las risas en toda esta etapa de mi vida.

Por último, agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por permitirme realizar mis estudios universitarios y al Grupo de Investigación en Seguridad Ambiente e Ingeniería, “GISAI”, por permitir la ejecución de esta investigación.

Bryan

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv

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
2.2. Estado del arte.....	5
2.2.1. <i>Gas natural</i>	5
2.2.1.1. <i>Consumo</i>	5
2.2.1.2. <i>Producción</i>	5
2.2.2. <i>Deshidratación de gas natural</i>	5
2.2.3. <i>La simulación en procesos de deshidratación de gas natural por absorción</i>	7
2.2.4. <i>Redes neuronales artificiales (RNA) en la deshidratación de gas natural por absorción</i>	9

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA.....	12
3.1. Metodología propuesta.....	12
3.2. Parámetros de funcionamiento.....	12

3.2.1.	<i>Proceso convencional</i>	13
3.2.2.	<i>Proceso optimizado</i>	14
3.2.2.1.	<i>Parámetros de funcionamiento de la torre de absorción</i>	15
3.2.2.2.	<i>Parámetros de funcionamiento de la torre de regeneración de glicol</i>	16
3.2.2.3.	<i>Parámetros de funcionamiento del separador flash</i>	16
3.2.2.4.	<i>Parámetros de funcionamiento del separador adicional</i>	17
3.3.	Simulación en DWSIM	17
3.4.	Análisis de sensibilidad	30
3.5.	Generación de datos	31
3.6.	Creación de la red neuronal artificial (RNA)	34
3.7.	Análisis estadístico	39

CAPÍTULO IV

4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	41
4.1.	Presupuesto	41
4.2.	Recursos materiales	41
4.3.	Cronograma	42
4.4.	Discusión y análisis de resultados	43
4.4.1.	Resultados de la simulación en DWSIM	43
4.5.	Validación de los resultados de DWSIM	43
4.6.	Balance de masa del sistema	45
4.6.1.	<i>Balance de masa para el separador 2</i>	47
4.6.1.1.	<i>Balance global del equipo</i>	47
4.6.1.2.	<i>Balance de masa por componente (HC)</i>	47
4.6.2.	<i>Balance de masa para la torre de absorción</i>	47
4.6.2.1.	<i>Balance global del equipo</i>	47
4.6.2.2.	<i>Balance de masa por componentes (HC)</i>	48
4.6.3.	<i>Balance de masa para el separador 1</i>	48
4.6.3.1.	<i>Balance global del equipo</i>	48
4.6.3.2.	<i>Balance de masa por componentes (TEG)</i>	49
4.6.4.	<i>Balance de masa para el regenerador</i>	49
4.6.4.1.	<i>Balance global del equipo</i>	49
4.7.	Resultados de la predicción de la red neuronal artificial (RNA)	50
4.7.1.	<i>Gráficos de desempeño de la RNA</i>	50
4.7.2.	<i>Gráficas de comparación entre las salidas simuladas y las predichas</i>	52
4.7.2.1.	<i>Análisis gráfico de los datos empleados para la creación de la RNA</i>	52

4.7.2.2.	<i>Análisis gráficos de los datos adicionales para validar la RNA</i>	57
4.8.	Resultados del análisis estadístico	61
4.8.1.	<i>Gráficos de cajas y bigotes</i>	61
4.8.2.	<i>Análisis ANOVA</i>	63
CONCLUSIONES		64
RECOMENDACIONES		65
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3.	Condiciones iniciales de la corriente de gas natural	13
Tabla 2-3.	Condiciones iniciales de la corriente de TEG (proceso convencional)	13
Tabla 3-3.	Condiciones iniciales de la corriente de TEG (proceso optimizado)	13
Tabla 4-3.	Condiciones de operación del absorbedor	15
Tabla 5-3.	Condiciones de operación del regenerador	16
Tabla 6-3.	Condiciones de operación del separador 1	16
Tabla 7-3.	Condiciones de operación del separador 2	17
Tabla 8-3.	Parámetros de operación de la bomba y los calentadores/enfriadores	19
Tabla 9-3.	Resultados del análisis de sensibilidad	30
Tabla 10-3.	Variables de entrada de la RNA	31
Tabla 11-3.	Variables de salida de la RNA	31
Tabla 12-3.	Pares de datos generados para la RNA	32
Tabla 13-3.	Selección de la configuración de la RNA	38
Tabla 1-4.	Presupuesto para el desarrollo del trabajo de integración curricular	41
Tabla 2-4.	Cronograma del Trabajo de integración Curricular	42
Tabla 3-4.	Resultados de las líneas de flujo más importantes de la simulación	43
Tabla 4-4.	Comparación de los valores del artículo con los simulados en DWSIM	44
Tabla 5-4.	Error cuadrático medio (MSE) en el diseño de la RNA	50
Tabla 6-4.	Valores simulados vs predichos del residuo de agua en el gas seco	52
Tabla 7-4.	Base de datos adicionales para validar la RNA	57
Tabla 8-4.	Valores simulados vs predichos del residuo de agua en el gas seco para la validación	58
Tabla 9-4.	Valores simulados vs predichos de la temperatura de gas seco para la validación	59
Tabla 10-4.	Valores simulados vs predichos del flujo de TEG perdido para la validación	60
Tabla 11-4.	Análisis ANOVA	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-3.	Proceso de deshidratación convencional por absorción de gas natural empleando TEG	14
Figura 2-3.	Diagrama de flujo de un proceso optimizado de deshidratación de gas natural por absorción empleando TEG.	15
Figura 3-3.	Flowsheet de la simulación del proceso en DWSIM.....	18
Figura 4-3.	Ventana inicial para crear una nueva simulación	20
Figura 5-3.	Panel para seleccionar los compuestos a utilizar.....	20
Figura 6-3.	Ventana para escoger los modelos termodinámicos.....	21
Figura 7-3.	Panel para seleccionar los compuestos a utilizar.....	21
Figura 8-3.	Ventana general del simulador DWSIM	22
Figura 9-3.	Panel para especificar el número de platos del absorbedor	22
Figura 10-3.	Panel especificar el puerto de las corrientes de entrada	23
Figura 11-3.	Panel definir el plato en cada corriente de entrada y salida.....	23
Figura 12-3.	Panel para especificar la presión en cada plato	24
Figura 13-3.	Panel para configurar la temperatura y presión del separador.....	24
Figura 14-3.	Panel de “ChemSep” para configurar el tipo de operación del regenerador	25
Figura 15-3.	Panel para configurar el modelo termodinámico del regenerador.....	25
Figura 16-3.	Panel para configurar las propiedades físicas del regenerador.....	26
Figura 17-3.	Panel para configurar las presiones de trabajo del regenerador	26
Figura 18-3.	Panel para configurar las especificaciones de la columna.....	27
Figura 19-3.	Especificación de las opciones numéricas de resolución	27
Figura 20-3.	Panel para configurar tanto los heaters como los coolers.....	28
Figura 21-3.	Panel para configurar la operación de la bomba	28
Figura 22-3.	Panel para especificar las opciones de solución	29
Figura 23-3.	Panel para especificar las opciones de solución	29
Figura 24-3.	Valores normalizados obtenidos en Excel.....	35
Figura 25-3.	Interfaz para escribir el código de la red neuronal	35
Figura 26-3.	Selección de las entradas y salidas de la red	36
Figura 27-3.	Selección del número de datos para el entrenamiento, validación y testeado de la red.....	36
Figura 28-3.	Selección del número de neuronas ocultas de la red	37
Figura 29-3.	Selección del tipo de algoritmo a emplear	37
Figura 30-3.	Estructura de la RNA	39
Figura 1-4.	Diagrama de flujo para el balance de masa	46

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4.	Evolución del MSE en la RNA	50
Gráfico 2-4.	Regresión de la etapa de entrenamiento y evaluación de la RNA.....	51
Gráfico 3-4.	Residuo de agua en el gas seco simulado vs predicha.....	55
Gráfico 4-4.	Temperatura de gas seco simulada vs predicha.....	56
Gráfico 5-4.	Flujo de TEG perdido simulado vs predicho.....	56
Gráfico 6-4.	Residuo de agua del gas seco en la validación	58
Gráfico 7-4.	Temperatura de gas seco en la validación	59
Gráfico 8-4.	Flujo de TEG perdido en la simulación.....	60
Gráfico 9-4.	Caja y bigotes para el residuo de agua en el gas seco	61
Gráfico 10-4.	Caja y bigotes para la temperatura del gas seco	62
Gráfico 11-4.	Caja y bigotes para el flujo de glicol perdido.....	62

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS PARA LA CREACIÓN DE LA RNA
- ANEXO B:** DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN DE LA RNA
- ANEXO C:** SCRIPT PARA LA CREACIÓN DE LA RNA
- ANEXO D:** SCRIPT PARA LA VALIDACIÓN DE LA RNA
- ANEXO E:** VALORES SIMULADOS VS PREDICHOS DE LA TEMPERATURA DE GAS SECO
- ANEXO F:** VALORES SIMULADOS VS PREDICHOS DEL FLUJO DE TEG PERDIDO

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con la finalidad de simular y validar un proceso de deshidratación de gas natural por absorción, empleando Trietilenglicol (TEG) con la ayuda del software DWSIM, dicho proceso sirvió como base para la creación de una Red Neuronal Artificial (RNA) con la capacidad de predecir las principales salidas del proceso. Para la creación de la RNA se desarrolló un análisis de sensibilidad, mediante el cual se determinaron las entradas y salidas del proceso. Se realizaron 100 simulaciones para obtener un conjunto de 100 pares de datos con las entradas y salidas determinadas. El software que se empleó fue MATLAB y se diseñó una red con siete neuronas ocultas que se entrenaron con el algoritmo de la regularización Bayesiana. El error cuadrático medio (MSE) que se obtuvo en la fase de prueba fue de $5.3824e-04$ con un coeficiente de regresión de 0,99746. Para la validación de la red se realizó un análisis estadístico con un conjunto de 20 datos adicionales, tomando en cuenta las mismas variables empleadas para el diseño. Se concluyó que con los resultados obtenidos no existió una diferencia significativa entre los valores simulados y los valores predichos con una confiabilidad del 95%, además, de que la RNA creada es apta para predecir las variables de salida que se determinaron. Se recomienda realizar un correcto procesamiento de los datos que se vayan a utilizar para crear una RNA a fin de minimizar la presencia de datos atípicos que pueden disminuir la capacidad de predictiva de la red.

Palabras clave: <GAS NATURAL>, <DESHIDRATACIÓN>, <TRIEILENGLICOL (TEG)>, <DWSIM (SOFTWARE)>, <ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <RED NEURONAL ARTIFICIAL (RNA)>, <ANÁLISIS ESTADÍSTICO>.



1627-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The present work was developed in order to simulate and validate a dehydration process of natural gas by absorption, using Triethylene glycol (TEG) with the help of the DWSIM software. This process served as the basis for the creation of an Artificial Neural Network (ANN) with the ability to predict the main outputs of the process. For the creation of the ANN, a sensitivity analysis was developed, by which the inputs and outputs of the process were determined. 100 simulations were performed to obtain a set of 100 data pairs with the determined inputs and outputs. The software used was MATLAB and a network was designed with seven hidden neurons that were tested with the Bayesian regularization algorithm. The mean square error (MSE) obtained in the test phase was $5.3824e-04$ with a regression coefficient of 0.99746. For the network validation, a statistical analysis was performed with a set of 20 additional data, taking into account the same variables used for the design. It was concluded that with the results obtained there was no significant difference between simulated values and predicted values with a 95% reliability, in addition, the created ANN is apt to predict the output variables that were determined. It is recommended to perform a correct processing of the data that will be used to create an ANN in order to minimize the presence of atypical data that can reduce the predictive capacity of the net.

Keywords: <NATURAL GAS>, <DEHYDRATION>, < TRIETHYLENE GLYCOL (TEG)>, <DWSIM (SOFTWARE)>, <SENSITIVITY ANALYSIS>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <ARTIFICIAL NEURONAL NETWORK (ANN)>, <STATISTICAL ANALYSIS>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El desarrollo de la industria petrolera acarrea varias formas de contaminación, las cuales modifican el equilibrio del medio ambiente. La principal causa es la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, carbón, diésel, gasolina, originando emisiones peligrosas causantes del efecto invernadero, lluvia ácida y el smog (Gómez Valdivieso, 2016, p.21).

El país se encuentra buscando la forma de usar un recurso que por muchos años ha sido quemado en las teas, se trata del gas natural, es por ello que, la empresa Ecuapet, ha implementado micro turbinas en diferentes sectores del país. Las mismas que cuentan con la ventaja de utilizar gas natural proveniente de las estaciones de producción como materia prima para la generación de energía eléctrica (Gómez Valdivieso, 2016, p.21).

El gas natural ya sea de forma libre o asociado al petróleo está compuesto principalmente de metano (CH_4), junto con otros hidrocarburos un poco más complejos y pesados como el etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), entre otros. También contiene agua, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno, y helio (Lapuerta, 2008, p.12).

La composición del gas natural es irregular, pero su componente principal es el metano con un porcentaje mínimo de hasta el 88,5%, el resto de sustancias se encuentra en forma de gas o como líquidos. Debido a las ventajas económicas y ecológicas que presenta el gas natural se vuelve cada vez más útil para muchos países, las características de este producto, como su reducido intervalo de combustión lo convierten en una de las fuentes de energía más seguras del mundo (Lapuerta, 2008, p.13).

Cuando el gas presenta más metano, así como otros hidrocarburos licuables a temperatura y presión ambiente junto con vapor de agua se denomina gas húmedo. (Moya Galarza, 2013, p.4). El agua que se encuentra presente puede ocasionar problemas como explosión de calderas, formación de hidratos de carbono y ácidos que son causantes de la corrosión producida en las líneas de transporte. (Falzone León, 2014, p.1).

El tratamiento de gas natural implica 4 pasos: endulzamiento (eliminación de ácidos), deshidratación (eliminación de agua), eliminación de aceite y condensados, y licuefacción del gas (Dávila, 2020, p.19).

Así mismo existen diversas formas de realizar la deshidratación del gas, como: la absorción con glicoles, adsorción con tamices moleculares, deliquesencia, expansión-refrigeración, permeación del gas y la tecnología Twister (Ribón, Santos Santos y Ortiz Cancino, 2010, p.56).

Actualmente la ciencia computacional se considera el tercer paradigma para los descubrimientos científicos, que al igual que la teoría y la experimentación se puede aplicar a la resolución de problemas con base en la ciencia y la tecnología. Desplazando los dos últimos métodos que por muchos años se consideraron las únicas alternativas de trabajo en los campos del conocimiento científico (Mostaccio, 2007, p.3).

Es este contexto, la simulación surge como un método poderoso e indispensable para analizar una variedad de problemas en investigación, síntesis de productos y desarrollo de procesos de producción. Esta otorga una comprensión cualitativa y cuantitativa de muchos fenómenos que son muy complejos para ser estudiados con los métodos analíticos tradicionales (Mostaccio, 2007, p.3).

1.2. Planteamiento del problema

El gas proveniente de los pozos se denomina gas saturado, ya que contiene vapor de agua en su composición, sustancia que se considera uno de los contaminantes más comunes en el gas debido a los problemas que ocasionaría en procesos posteriores (Aranea, Dominguez y Perugachi, 2012, p.2).

Por lo tanto, es necesario un proceso de deshidratación del mismo donde se elimine la mayor cantidad de agua presente a fin de cumplir normas establecidas y evitar los riesgos que esta sustancia ocasionaría en el caso de presentarse alguna perturbación en la presión o temperatura.

Los problemas que ocasiona la presencia de agua en el gas son:

- Formación de hidratos de carbono causantes de la obstrucción o taponamiento en las líneas de transporte.
- Corrosión en las tuberías (gasoductos) debido a la formación de ácidos por la presencia de azufre y CO₂.
- El agua puede llegar a condensarse ocasionando problemas en el transporte del gas o equipos como compresores (Aranea, Dominguez y Perugachi, 2012, p.5).

Los métodos más utilizados en la industria para la deshidratación del gas son la absorción con Trietilenglicol (TEG) y la adsorción con tamices moleculares, este último siendo el más efectivo solo cuando se va a utilizar el gas seco para procesos criogénicos de recobro de líquidos, además es un proceso costoso por lo que su aplicación depende mucho de la rentabilidad del proyecto. Es por ello que el método más utilizado es el primero, principalmente por el bajo costo y la facilidad de regeneración del glicol (Ribón, Santos Santos y Ortiz Cancino, 2010, p.61).

El proceso típico de deshidratación por absorción empleando TEG consta de una columna de absorción, un separador flash, una columna de regeneración, intercambiadores de calor y una bomba, obteniéndose una buena reducción de agua del gas, pero, el presente trabajo propone una optimización del proceso instalando una columna de separación adicional, la que permitirá aumentar la pureza del glicol y por ende una mayor disminución del contenido de agua.

Posteriormente se generará una base de datos que servirán para el desarrollo de una Red Neuronal Artificial (RNA) empleando el software MATLAB, que será capaz de predecir la cantidad de agua, temperatura de salida y pérdida de glicol que se obtiene al modificar las condiciones de temperatura de entrada, presión del absorbedor y calor del reboiler.

1.3. Justificación del proyecto

Una de las principales razones para la deshidratación del gas proviene de su principal uso, que es la obtención de energía. Si este contiene agua en su composición afectaría en gran medida al poder calorífico del mismo, haciendo al gas inutilizable para el proceso provocando pérdidas económicas en la empresa (Falzone León, 2014, p.6).

Por otro lado, la deshidratación de gas natural por absorción utilizando el trietilenglicol resulta efectiva, debido a que el agua presenta una alta afinidad con los glicoles, que son sustancias con la capacidad de absorber gran parte del líquido presente convirtiendo el gas húmedo (saturado) que se tiene como alimentación en gas seco como producto de interés, el cual se podrá utilizar como fuente de energía o procesos que más convengan a nivel industrial (Ribón, Santos Santos y Ortiz Cancino, 2010, p.56).

La realización de una simulación cuenta con la principal ventaja de disminuir los tiempos de cálculo, esto debido a que se pueden modificar tantas variables como sea necesario y obtener resultados al instante, además, se puede tener mucha más información del proceso lo que permitiría un mejor análisis del mismo e incluso tener la capacidad de idear una mejora u optimización (Nuñez Rodríguez y Cumpa Bardales, 2015, p. vi).

La utilización de softwares como el DWSIM presenta múltiples ventajas como:

- Licencia gratuita por lo que no se necesita desembolsar efectivo para adquirir el programa.
- Presenta una interfaz sencilla y fácil de entender.
- Gran variedad de equipos que se utilizan en procesos industriales.
- Resultados que se asemejan a los que se pueden obtener con otros programas como Aspen HYSIS (Nuñez Rodríguez y Cumpa Bardales, 2015, p. vi).

Por todo lo expuesto es que se considera que el desarrollo del presente trabajo se justifica debido a que se podrán obtener resultados rápidos que se asemejan a los que se tienen a nivel industrial.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Realizar la simulación y validación de un proceso de deshidratación de gas natural por absorción utilizando Trietilenglicol con la ayuda del software DWSIM.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Validar la simulación de deshidratación de gas natural comparando los resultados obtenidos con referentes bibliográficos de alto impacto.
- Realizar un análisis de sensibilidad del proceso para determinar las entradas y salidas de la RNA.
- Diseñar y construir una red neuronal artificial (RNA) para predecir la cantidad de agua removida y porcentaje de Trietilenglicol que se pierde en el proceso.
- Evaluar a capacidad de predicción de la RNA mediante un análisis estadístico.

1.5. Alcance

En el presente trabajo se realiza la simulación y posterior validación de un proceso de deshidratación de gas natural con optimización, mediante un proceso de absorción con TEG, que extrae el agua del gas en una columna de absorción de alta presión y a la vez se produce la regeneración del glicol con una pureza mayor a la que se obtiene en el proceso convencional mediante una columna de destilación de baja presión, seguida de un separador flash.

Para el desarrollo de la simulación se utiliza el software para procesos químicos DWSIM. A continuación, en base a la validación de la simulación, se genera una base de 100 pares de datos que servirán para la construcción de una RNA en MATLAB que podrá predecir las principales salidas del proceso: temperatura de salida del gas, cantidad de agua presente en el gas y la pérdida que se produce de glicol, todo mediante un análisis de sensibilidad que permitirá determinar las entradas de RNA.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.2. Estado del arte

2.2.1. *Gas natural*

2.2.1.1. *Consumo*

En el año 2019, el consumo mundial de gas vio un incremento del 2,6%, aunque en términos generales es una buena cifra, no se compara en nada a lo conseguido en el 2018, que fue un año récord con incremento del 5,1% (ENERDATA, 2020).

Estados Unidos es el país que más consume gas natural, en el 2019 creció en un 3,1% debido a la disminución de los valores y nuevas capacidades de generación con gas en el sector eléctrico, mientras que China vio reducir el crecimiento de consumo de gas a la mitad (8,6%) producto de una desaceleración económica (ENERDATA, 2020).

En lo que respecta a la UE (Unión Europea) el consumo aumentó en un 3,1%, debido a que la demanda se recuperó en países como Alemania, Italia y España. Por último, en Latinoamérica, se evidenció un consumo de gas estable, con ligeros descensos en Brasil y Argentina, pero con 4,4% de crecimiento en México (ENERDATA, 2020).

2.2.1.2. *Producción*

La mayor parte de la producción de gas natural se concentra en Estados Unidos, también destacan otros países como Rusia, Irán, Catar y Canadá, estos países sumados a otros diez superan la producción de 60 bcm (millones de metros cúbicos) por año (Lloret, 2015, p.237).

Es importante destacar que la trayectoria seguida por la producción de gas en EE. UU., ha pasado de 28 bcm, a más de 200 bcm en 2012. Junto con EE. UU., Oriente Medio y Asia han aportado las mayores cantidades de producción de gas natural (Lloret, 2015, p.237).

2.2.2. *Deshidratación de gas natural*

Entre los diversos tratamientos que se le debe dar al gas natural se encuentra la deshidratación, método que sirve para disminuir el agua que puede estar presente en fase líquida o vapor y en cantidades diferentes que dependerán de las condiciones del pozo, que como se explicó en la

sección anterior puede causar serios problemas durante el transporte y almacenamiento del mismo (Neagu y Cursaru ,2017, p.327).

A lo largo de los años se han realizado diversos trabajos de investigación respecto al tema, mismos que se darán a conocer a continuación.

Una tecnología que se presenta como una alternativa novedosa para la deshidratación de gas es el método de membrana, que cuenta con ventajas propias de las membranas como el tamaño reducido y la buena fiabilidad para su funcionamiento en lugares remotos. Pero, dicho proceso afronta dos grandes problemas. En primer lugar, cuando los polímeros que son elevadamente selectivos se convierten en membranas industriales formadas de películas delgadas. Dicho problema provoca que haya una disminución relevante en la permeabilidad aparente del agua y selectividad H_2O/CH_4 de las membranas compuestas (Lin et al., 2013, p.106-103).

En segundo lugar, la deshidratación está restringida por relaciones moderadas de presión de alimentación ha permeado. Pero, se ha demostrado que los procesos de membrana con barrido de gas seco en el permeado son competitivos con las plantas convencionales de glicol para la deshidratación del gas (Lin et al., 2013, p.106-103).

En el proceso de adsorción para separar el agua del gas natural se necesita de forma esencial un adsorbente que extraiga el contenido de agua presente. Pero, aunque existan un sin número de adsorbentes es importante que los mismos presenten una alta estabilidad química frente a otros contaminantes como también alta estabilidad mecánica a la atrición, que sean baratos y energéticamente eficientes. El principal desafío de este método es el desarrollo de adsorbentes que sean más tolerantes a la humedad ya que genera un costo alto debido al secado adicional. (Tagliabue et al., 2009, p.555-563).

El método de absorción con absorbentes como el Trietilenglicol (TEG) ha sido el más utilizado en la producción industrial, que consta de dos fases. La primera es la absorción del agua presente en el gas húmedo mediante un absorbedor, mientras que la segunda fase es la desorción del agua que queda atrapada en el solvente, paso que se da en una columna de destilación denominada regenerador. Esta segunda etapa es la más importante porque si no elimina el agua del glicol al momento que se dé su recirculación afectaría directamente a la calidad del gas (Yu et al., 2017, p.2). Para este método Bahadori y Vuthaluru (2009b p.1910-1916), desarrollaron un método para realizar el dimensionamiento de la torre de absorción para una variedad de condiciones iniciales. Mediante ecuaciones algebraicas de fácil resolución pudo correlacionar la eficiencia de remoción de agua en función de la velocidad de circulación del TEG como también de su concentración. Con el fin de poder determinar el tamaño correcto del contactor, debido a que dicho parámetro es crucial en el diseño de plantas de deshidratación por absorción.

Uno de los primeros pasos en el diseño de un sistema de TEG es determinar cuál será el punto de rocío del agua presente en el gas de salida a partir de la concentración del glicol. Para ello Bahadori y Vuthaluru (2009a, p.68) determinaron una correlación fácil en la que se puede

determinar la caída del punto de rocío que se dará a partir de una determinada concentración de TEG y temperatura de la torre de absorción, sabiendo que los puntos de rocío dependen de la velocidad de circulación del TEG y número de etapas en el equilibrio.

Netusil y Dittl (2011, p.475-476) compararon los métodos por absorción y adsorción mediante un enfoque energético. En los casos donde el gas permanece almacenado a una determinada presión y la diferencia con la presión de distribución es mínima, el método de absorción toma ventaja ante el método por adsorción en cuanto a la demanda de energía debido a que la regeneración del TEG es menos exigente que la regeneración del adsorbente.

2.2.3. La simulación en procesos de deshidratación de gas natural por absorción

C. et al. (2015, p.68-72) hicieron la simulación de una planta de deshidratación de gas natural por absorción convencional utilizando el software Aspen HYSYS, herramienta útil para procesos que tienen que ver con petróleo y gas. Las condiciones de operación fueron obtenidas de una compañía petrolera ubicada al sur de Nigeria. Con su trabajo determinaron que se requiere de un mínimo de 53 litros/hora de TEG para producir un gas seco con 6,455 lb/MMSCFD (libras de agua por millón de pies cúbicos estándar diarios de gas procesado). Para ello fue variando el flujo de TEG y encontró que una tasa mayor a 70 litros/hora no generaría un mayor valor financiero al gas seco. Por otro lado El Mawgoud et al. (2015, p.475) mediante el uso de la simulación desarrollaron una renovación de la planta de deshidratación “Akik” ubicada en Egipto, de igual manera empleando el software Aspen HYSIS como herramienta principal. Se propusieron 3 ideas para la optimización del proceso convencional, que, mediante los ensayos hechos en la simulación se determinó que la opción número 3 es la mejor para las condiciones que exige la planta, obteniéndose a su vez menor consumo de energía para el funcionamiento del proceso, así como también menor costo de inversión en los equipos.

Por su parte Nmegbu Chukwuma (2014, p.346-347), realizó una simulación en HYSIS para determinar los parámetros más influyentes. Los parámetros que analizó fueron:

- Tasa de circulación de glicol.
- Número de platos en la torre de absorción.
- Temperatura del calderín.
- Tasa de extracción de gas (Nmegbu Chukwuma, 2014, p.346-347).

Las condiciones iniciales se obtuvieron de una planta de deshidratación ubicada en el Níger. Mediante la prueba determinó que una temperatura mayor a los 200°C en el calderín ocasiona la descomposición del glicol. A parte, la utilización de gas de arrastre genera un efecto mayor que solamente aumentar la temperatura del reboiler. Para obtener una máxima eficiencia es recomendable que el gas de arrastre ingrese a la columna después de que se haya eliminado el glicol en el hervidor (Nmegbu Chukwuma, 2014, p.346-347).

Arya et al. (2014, p.11766) diseñaron un paquete de propiedades termodinámicas basado en CPA (Cubic-Plus-Association) para aplicaciones en procesos donde se use TEG, debido a que dicha ecuación de estado ha demostrado su eficacia para cálculos de equilibrio de fase TEG-Agua.

Al combinar el paquete CPA con un simulador que presente la herramienta CAPE-OPEN se puede realizar con éxito la simulación de un proceso de deshidratación de gas natural. Los parámetros binarios de TEG-agua se someten a regresión en función de diversos datos experimentales que incluyen el equilibrio Vapor-Líquido, coeficientes de actividad, coeficientes de actividad de dilución infinita y entalpías de exceso (Arya et al. 2014, p.11775).

Por su parte Petropoulou y Voutsas (2018, p.1) estudiaron el modelo termodinámico de las Reglas de Mezcla Universal-Peng Robinson-UNIFAC (UMR-PRU) y su aplicación en el modelado termodinámico de mezclas de gas natural con agua y TEG.

También aplicó el modelo en simuladores como Aspen HYSYS mediante la herramienta CAPE-OPEN para realizar la simulación del proceso de deshidratación de gas natural y comparar los resultados obtenidos con otros modelos termodinámicos como el NRTL/TST que es el recomendado por HYSIS (Petropoulou y Voutsas, 2018, p.1).

Con los dos modelos calculó la pureza del TEG inicial, tasa de circulación de TEG, y una tasa de gas de arrastre similares para obtener un mismo nivel de deshidratación. Evidenciándose resultados satisfactorios en todos los casos, especialmente para la solubilidad del TEG en el metano, que es de vital importancia para el cálculo de la pérdida de TEG durante el proceso de regeneración. Aunque los dos paquetes termodinámicos estudiados difieren en el cálculo de la pérdida del glicol, y a su vez también predice calores más bajos en el recalentador, condensador y los intercambiadores de calor se considera que UMR-PRU está más cerca del caso real que el otro modelo debido a la mejor predicción de las capacidades de calor TEG/agua (Petropoulou y Voutsas, 2018, p.37).

La mejor forma de determinar los parámetros de operación de una planta de deshidratación de gas natural es mediante un análisis de sensibilidad. Tal como lo hizo Ranjbar et al. (2015, p.39) que mediante el uso de una función de sensibilidad optimizaron una planta convencional.

Ellos determinaron que el contenido de agua en el gas seco controla el rendimiento de toda la planta y evaluaron como esta variable es afectada por diferentes parámetros como la tasa de circulación de TEG y la temperatura del gas húmedo (Ranjbar et al., 2015, p.43).

Para el primer parámetro, notaron que aumentar su valor significaría aumentar los costos operativos, y disminuirlo provocaría una mala deshidratación del gas. Para la planta estudiada se llegó a la conclusión de que un flujo de glicol de 4000 kg/h es lo ideal. Al aumentar dicho valor no se lograría mayor ventaja respecto a la deshidratación, mientras que al disminuir se corre el riesgo de que el gas aun contenga cantidades significativas de agua (Ranjbar et al., 2015, p.43).

Para el segundo parámetro llegaron a la conclusión de que el valor ideal es 300k, un valor menor conduciría a la formación de hidratos en las tuberías, caso contrario produciría un gas de salida en malas condiciones (Ranjbar et al., 2015, p.43-44).

La mayoría de las investigaciones se basan en determinar los puntos de rocío o contenido de agua del gas seco, pero Chebbi et al. (2019, p.723) además de proponer una optimización para el proceso, también calcularon el costo de procesamiento mínimo, incluido servicios y costo de inversión, utilizando la herramienta optimizadora para minimizar dichos valores.

Al proceso convencional le adicionaron una columna de separación, en la que se inyecta gas de arrastre para purificar el glicol que sale del regenerador. Mediante la herramienta de costos determinaron que el aumento adicional de capital es pequeño cuando se incluye el gas de arrastre (Chebbi et al., 2019, p.724).

De igual manera determinaron lo siguiente:

- Menor costo de deshidratación cuando se trabaja a presiones más altas.
- Un costo mínimo en la deshidratación cuando en la torre de absorción se trabaja con una temperatura baja.
- Costo de deshidratación reducido al emplearse una concentración alta de TEG.
- Reducción del costo cuando se inyecta el gas de arrastre a una columna de separación en vez de que ingrese de forma directa al regenerador (Chebbi et al., 2019, p.731).

2.2.4. *Redes neuronales artificiales (RNA) en la deshidratación de gas natural por absorción*

Mohammadi y Richon (2007, p.1431) usaron redes neuronales artificiales para determinar el contenido de agua en el gas natural a bajas temperaturas y presiones elevadas. Esto se debió a que el contenido de agua que existe en esas condiciones es muy pequeño por lo que los modelos clásicos presentaban una menor precisión para determinar dicho valor.

Diseñaron una red neuronal artificial feed-forward con el algoritmo Levenberg-Marquardt modificado lo que aseguraba una alta precisión para la regresión. La estructura de la red que implementaron contenía 2 capas de entrada (Presión y temperatura inversa), 6 capas ocultas y 1 capa de salida (contenido de agua). Mediante un análisis estadístico determinaron que el porcentaje de desviación absoluta promedio es de 4,4% (Mohammadi y Richon, 2007, p.1433)

Darwish y Hilal (2008, p.189) utilizaron redes neuronales artificiales para detectar las fallas en una planta de deshidratación de gas natural analizando las perturbaciones en las variables de entrada de la torre de absorción, la torre de destilación (regenerador) y para la planta en general. Para la obtención de los pares de datos realizaron una simulación y posterior análisis de sensibilidad modificando las entradas en un rango de -20% a +20% obteniendo un total de 100 ensayos.

Las variables de entrada para el contactor fueron:

- Flujo de glicol.
- Concentración másica de glicol.
- Temperatura del glicol.
- Flujo de gas a la entrada.
- Fracción molar de agua inicial.
- Presión de la torre.

Para el regenerador usaron las siguientes variables:

- Calor del reboiler.
- Temperatura de entrada del glicol rico.
- Flujo de gas se separación.

Mientras que para la planta en general tomaron las siguientes:

- Flujo de glicol.
- Temperatura del glicol.
- Presión del absorbedor (Darwish y Hilal 2008, p.194).

Mediante el uso de las redes determinaron que la principal falla en la torre de absorción se da por concentraciones anormales de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en el glicol que sale de la torre. En el regenerador encontraron que las fallas se dan por emisiones de TEG y BTEX y en menor medida por COVs (compuestos orgánicos volátiles). Por último, para la planta general se determinó que las principales fallas son por las tres respuestas anteriormente mencionadas en los equipos analizados (Darwish y Hilal 2008, p.196).

Uno de los principales inconvenientes es el desarrollo de métodos para obtener un glicol de alta pureza, es por ello que Ghiasi et al. (2014, p.26) estudiaron el efecto de la presión y temperatura en el recalentador a fin de obtener una mayor pureza de TEG.

Para su estudio emplearon una RNA de tipo perceptrón multicapa (MLP) la cual se entrenó, validó y evaluó. Usaron el método iterativo Levenberg-Marquardt y mediante un procedimiento de prueba y error establecieron que la estructura optima de la red es 2-11-1 (2 capas de entrada, 11 capas ocultas y 1 capa de salida) (Ghiasi et al., 2014, p.28).

Los resultados mostraron que al modificar la temperatura (149°C a 204°C) y presión (67 kPa a 122 kPa) llegaron a obtener hasta una pureza del 99,8% de TEG con una desviación absoluta promedio de 0,30% (Ghiasi et al., 2014, p.31).

De igual forma Ghiasi et al. (2015, p.421) también establecieron que la inyección de gas de arrastre en el rehervidor es una manera eficaz de aumentar la pureza del TEG. Por lo que diseñó dos redes neuronales. Una red neuronal MLP y una LSSVM (algoritmo de máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados) con la finalidad de predecir el flujo de gas de arrastre óptimo en una planta de deshidratación de gas.

Para su trabajo tomaron como entradas la temperatura y flujo de gas de arrastre que ingresa al regenerador, mediante ensayos de prueba y error establecieron que la estructura óptima para ambas redes contiene 2 capas de entrada, 9 capas ocultas y 1 capa de salida. Ambos modelos demostraron una buena capacidad predictiva de la pureza del TEG ya que mediante un análisis estadístico determinaron que había una desviación absoluta promedio inferior al 0,01% (Ghiasi et al., 2015, p.427).

Ahmadi et al. (2014, p.1) desarrollaron un método confiable para estimar el punto de rocío del agua presente en una corriente de gas natural a diferentes concentraciones y temperaturas de TEG, su estudio se basó en que la única manera de lograr una reducción apreciable en el punto de rocío es aumentando la pureza del solvente.

La mayoría de métodos existentes que determinan la misma variable, a pesar de tener una buena capacidad predictiva tienen el problema de que solo sirven para los sistemas que fueron diseñados, por lo no llegan a ser totalmente fiables. Es por eso que la creación de un modelo general competente a partir de redes neuronales artificiales resultó idóneo para el caso (Ahmadi et al. 2014, p.2).

En su trabajo emplearon dos tipos de RNAs entrenadas con algoritmos diferentes. El PSO (optimización de enjambre de partículas) y el BP (retropropagación). Ambos modelos fueron elaborados en base a datos presentes en bibliografía con temperaturas de 10°C y 80°C para el ingreso del TEG y concentraciones entre 90% y 99,999% del mismo. Su trabajo determinó que la red entrenada con el algoritmo PSO presentó una mejor precisión en la predicción del punto de rocío del agua respecto al algoritmo BP (Ahmadi et al., 2014, p.8).

Por su parte Afshin et al. (2016, p.173) también desarrolló un método con el cual determinar la temperatura del punto de rocío del gas, pero, utilizó redes neuronales diferentes. Usaron el perceptrón multicapa y la red neuronal de función en base radial (RBF-RNA). Los datos con los que trabajaron fueron los mismos que emplearon (Ahmadi et al. 2014, p.8).

Con su trabajo demostraron que tanto el modelo MLP y el RBF pueden predecir datos experimentales con una precisión aceptable en base a parámetros estadísticos. Pero, a su vez determinaron que el modelo MLP muestra una superioridad sobre el modelo RBF y también sobre los modelos propuestos por Ahmadi et al. (2014, p.1) (Afshin et al., 2016, p.179).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología propuesta

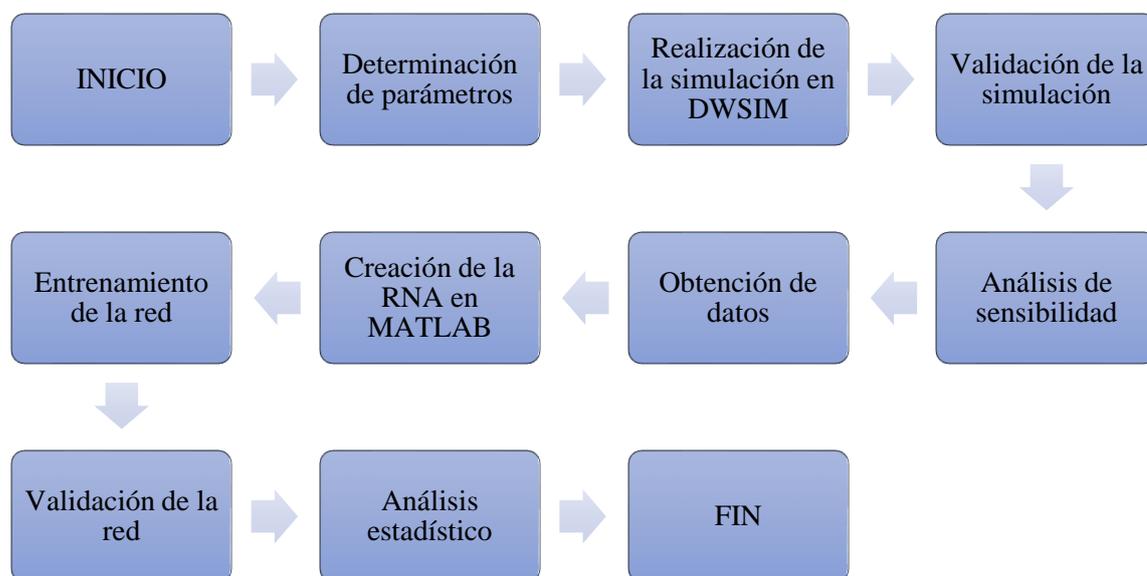


Gráfico 1-3. Metodología del trabajo de integración curricular

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.2. Parámetros de funcionamiento

Los parámetros básicos para llevar a cabo la simulación se tomaron del artículo científico titulado: *Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas*, Elaborado por Chebbi et al., (2019) del Departamento de Ingeniería Química, Universidad Americana de Sharjah, P.O. Box 26666, Sharjah, Emiratos Arabes Unidos.

Para el proceso convencional (sin columna de extracción) y para el proceso optimizado (incluye columna de extracción) tenemos:

Tabla 1-3. Condiciones iniciales de la corriente de gas natural

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	310,9	K
Presión	4137	KPa
Flujo másico	19,19	Kg/s
Fracción de metano	84,20	%
Fracción de etano	15,60	%
Fracción de agua	0,1897	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.727).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Tabla 2-3. Condiciones iniciales de la corriente de TEG (proceso convencional)

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	319,3	K
Presión	4137	KPa
Flujo másico	0,6733	Kg/s
Fracción de TEG	99	%
Fracción de agua	1	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.727).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Tabla 3-3. Condiciones iniciales de la corriente de TEG (proceso optimizado)

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	319,3	K
Presión	4137	KPa
Flujo másico	0,6434	Kg/s
Fracción de TEG	99,5	%
Fracción de agua	0,5	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.727).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.2.1. Proceso convencional

En la figura 1-3 se muestra el diagrama de flujo de una planta de deshidratación convencional de gas natural con TEG.

En la primera torre ingresa el gas natural con su fracción de agua por la parte inferior mientras que el TEG lo hace por la parte superior. El gas seco sale de torre por la parte de arriba y el glicol rico en agua se dirige al condensador del regenerador para aumentar su temperatura y liberarse de

hidrocarburos ligeros en el separador flash. A continuación, ingresa a la torre de regeneración para desprenderse del contenido de agua absorbido y recircularse a través de una bomba a la torre de absorción, alcanzando una pureza máxima del 99%.

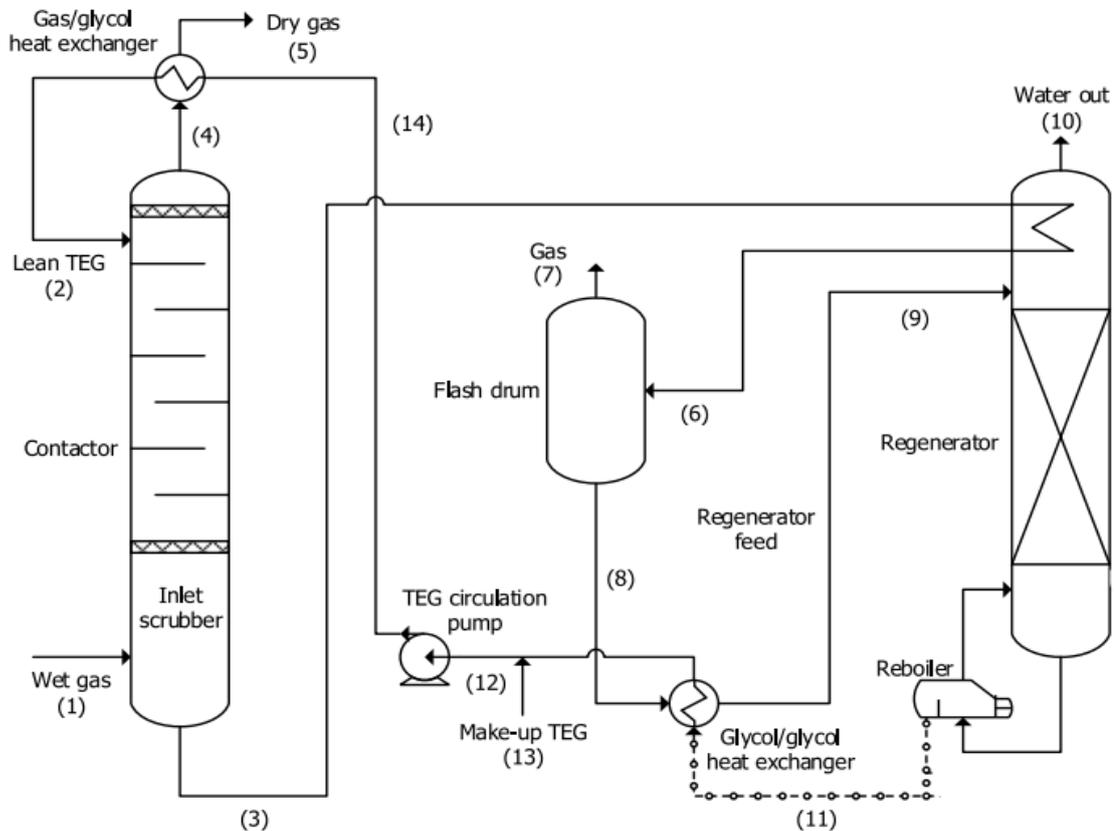


Figura 1-3. Proceso de deshidratación convencional por absorción de gas natural empleando TEG
Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.725).

3.2.2. Proceso optimizado

En la figura 2-3., se muestra un proceso optimizado de deshidratación de gas natural por absorción empleando TEG.

En este proceso se agrega una columna de separación que emplea gas de extracción ayudando a purificar de mejor manera el glicol que sale del regenerador. El glicol de mayor pureza sale del separador por la parte inferior con una pureza del 99,5% y continua el proceso convencional, mientras que el gas de extracción se reingresa a la columna de regeneración.

Chebbi et al., 2019, p725 realizaron la optimización del proceso empleando el software Aspen HYSIS y la ecuación de estado Twu-Sim-Tassone.

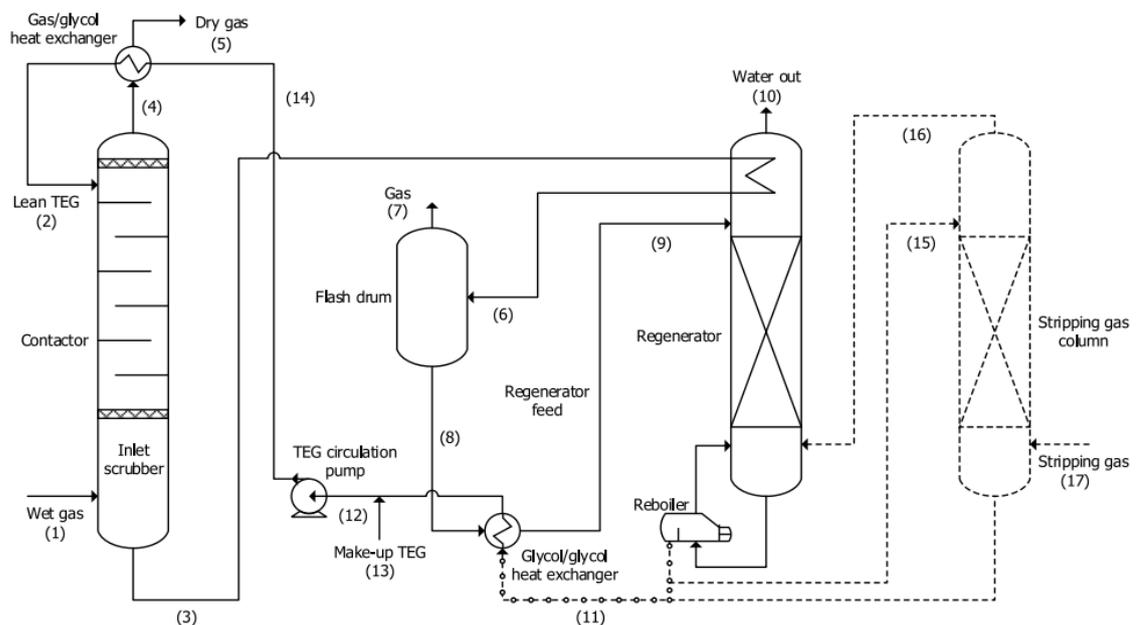


Figura 2-3. Diagrama de flujo de un proceso optimizado de deshidratación de gas natural por absorción empleando TEG.

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.725).

3.2.2.1. Parámetros de funcionamiento de la torre de absorción

Tabla 4-3. Condiciones de operación del absorbedor

Parámetro	Valor	Unidad
Presión	4137	KPa
# platos	2	-
Flujo másico de gas húmedo	19,19	Kg/s
Flujo másico de TEG	0,6434	Kg/s
Flujo másico de gas seco	19,15	Kg/s
Fracción de agua en el gas seco	0,01302	%
Flujo másico de TEG rico	0,6778	Kg/s
Fracción de TEG	94,45	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.727).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.2.2.2. *Parámetros de funcionamiento de la torre de regeneración de glicol*

Tabla 5-3. Condiciones de operación del regenerador

Parámetro	Valor	Unidad
Presión	101,325	KPa
# platos	3	-
# plato de alimentación	2	-
Flujo másico de TEG rico	0,6773	Kg/s
Flujo másico de gas a regenerar	0,0098	Kg/s
Flujo másico de destilado	0,0370	Kg/s
Flujo másico de fondo	0,6501	Kg/s
Fracción de TEG (Destilado)	0,00714	%
Fracción de TEG (Fondo)	99,05	%
Calor del condensador	-52	KW
Calor del reboiler	159,5	KW

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.728).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

El condensador usado fue uno parcial y el reboiler fue total.

3.2.2.3. *Parámetros de funcionamiento del separador flash*

Tabla 6-3. Condiciones de operación del separador 1

Parámetro	Valor	Unidad
Presión	532	KPa
Flujo másico de TEG rico	0,6778	Kg/s
Flujo másico de gases volátiles	4,6018E-04	Kg/s
Flujo másico de TEG rico líquido	0,6773	Kg/s
Fracción de TEG en el líquido	94,51	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.728).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.2.2.4. *Parámetros de funcionamiento del separador adicional*

Tabla 7-3. Condiciones de operación del separador 2

Parámetro	Valor	Unidad
Presión	101,325	KPa
Flujo másico de gas de extracción	0,003	Kg/s
Flujo másico de TEG pobre	0,6501	Kg/s
Flujo másico de gas a regenerar	0,0098	Kg/s
Flujo másico de TEG purificado	0,6434	Kg/s
Fracción de TEG	99,50	%

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.728).

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.3. Simulación en DWSIM

Para la simulación a realizar del proceso optimizado de deshidratación de gas natural se emplearán como base los parámetros detallados en las tablas 1-3, 3-3, 4-3, 5-3, 6-3 y 7-3, usando el software DWSIM.

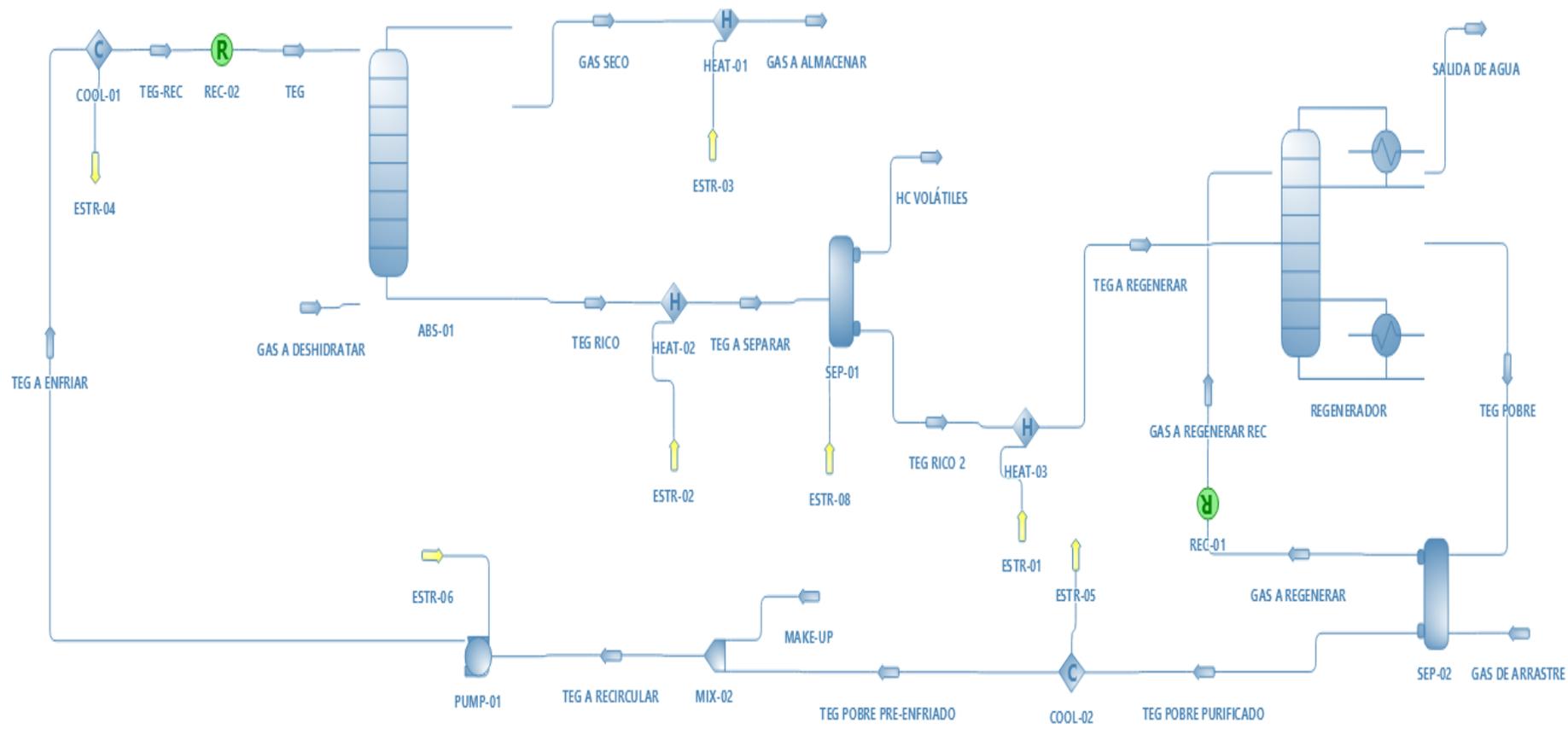


Figura 3-3. Flowsheet de la simulación del proceso en DWSIM

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Se empleó una combinación de paquetes termodinámicos diferentes para cada columna y un mismo paquete para las líneas de flujo.

- Las líneas de flujo operan con el paquete de propiedades de Pen- Robinson (PR).
- El absorbedor utiliza el modelo UNIQUAC.
- El separador flash (SEP-01) trabaja con el paquete NRTL.
- El separador que opera con el gas de arrastre (SEP-02) utiliza el modelo UNIQUAC.
- La torre de regeneración se simula como una torre de destilación del modelo “ChemSep Column”.
- La torre de destilación emplea el paquete termodinámico Raoult’s Law/ Antoine/Peng-Robinson-76.
- Al no existir suficientes datos para los intercambiadores de calor se utilizaron enfriadores y calentadores.
- La configuración de la bomba y los equipos de calentamiento/enfriamiento se describen en la table 8-3.

Tabla 8-3. Parámetros de operación de la bomba y los calentadores/enfriadores

Equipo	Parámetro	Valor	Unidad
Bomba	Potencia requerida	3,21	KW
Heater 01	Calor suministrado	33,45	KW
Heater 02	Calor suministrado	52,72	KW
Heater 03	Calor suministrado	201,299	KW
Cooler 01	Calor extraído	39,77	KW
Cooler 02	Calor extraído	168,736	KW

Fuente: (Chebbi et al., 2019, p.728)

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

A continuacion se darán a conocer los pasos más improtantes de la simulación.

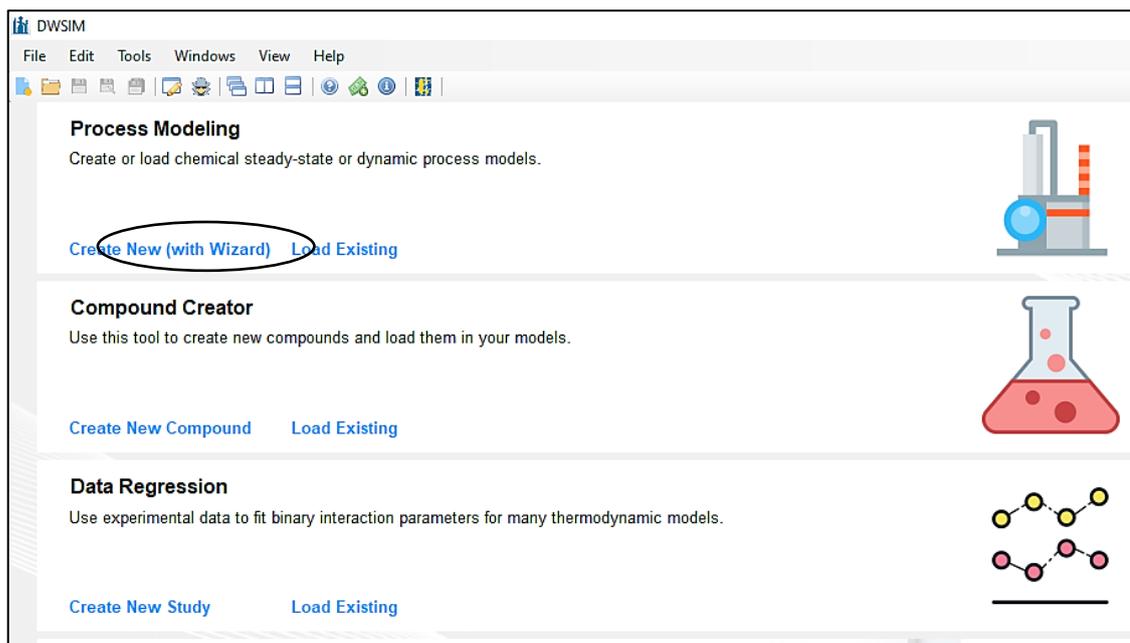


Figura 4-3. Ventana inicial para crear una nueva simulación

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

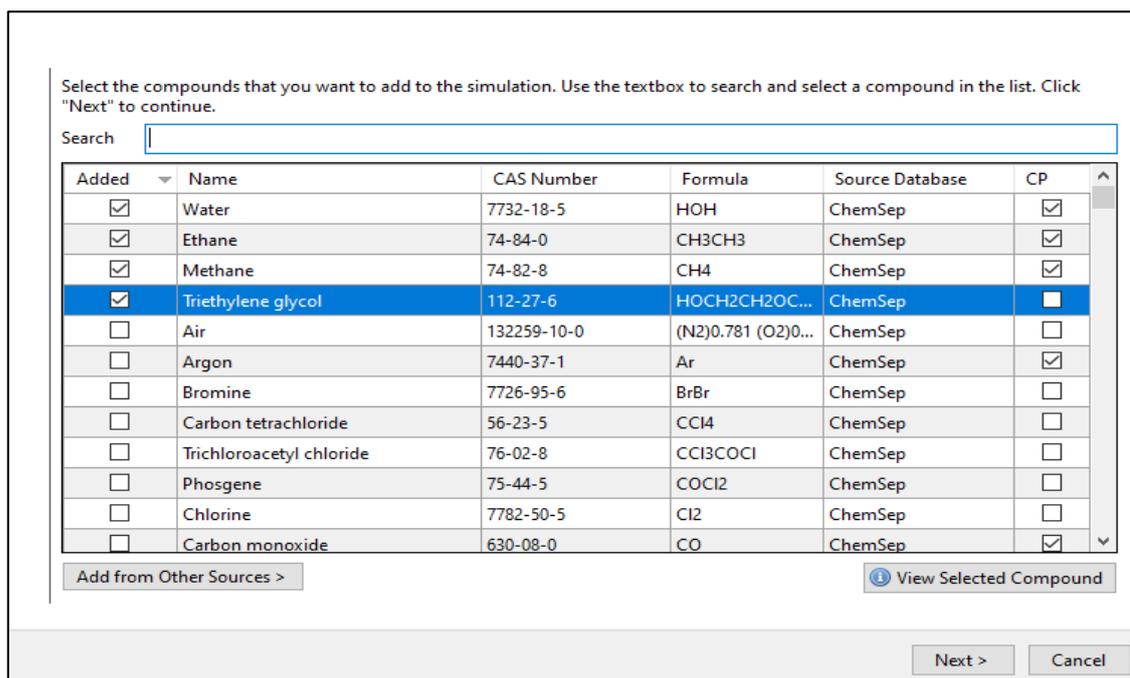


Figura 5-3. Panel para seleccionar los compuestos a utilizar

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

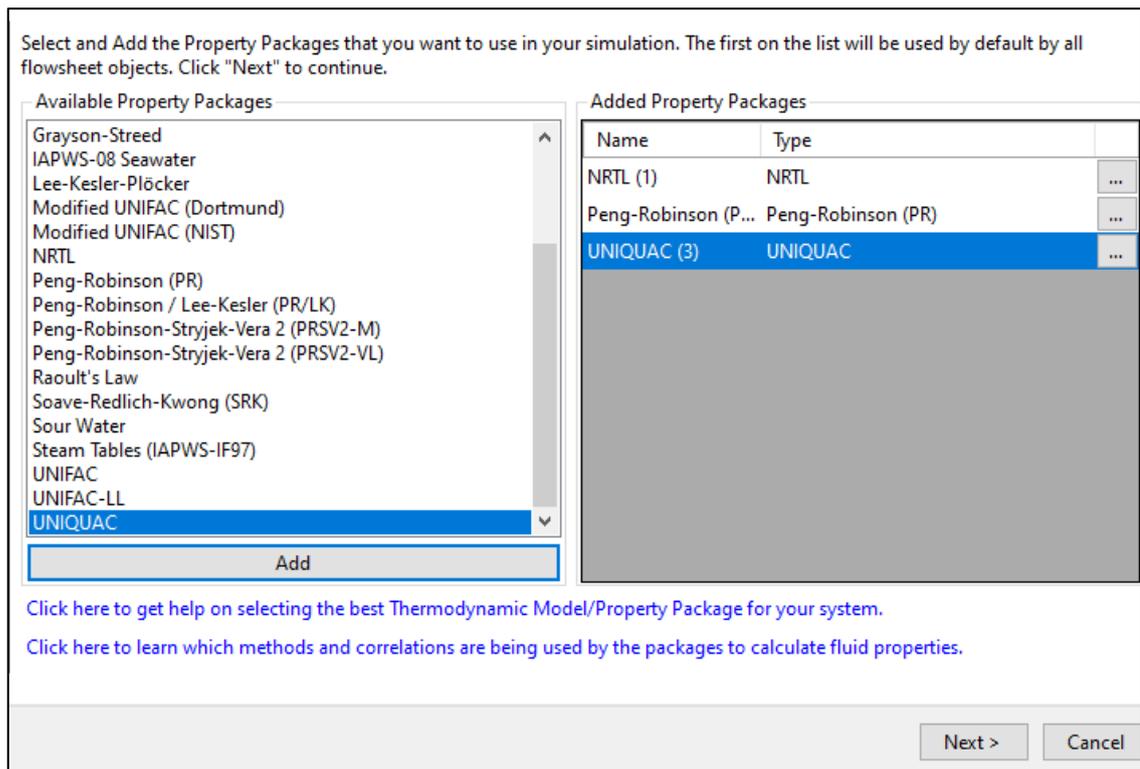


Figura 6-3. Ventana para escoger los modelos termodinámicos

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

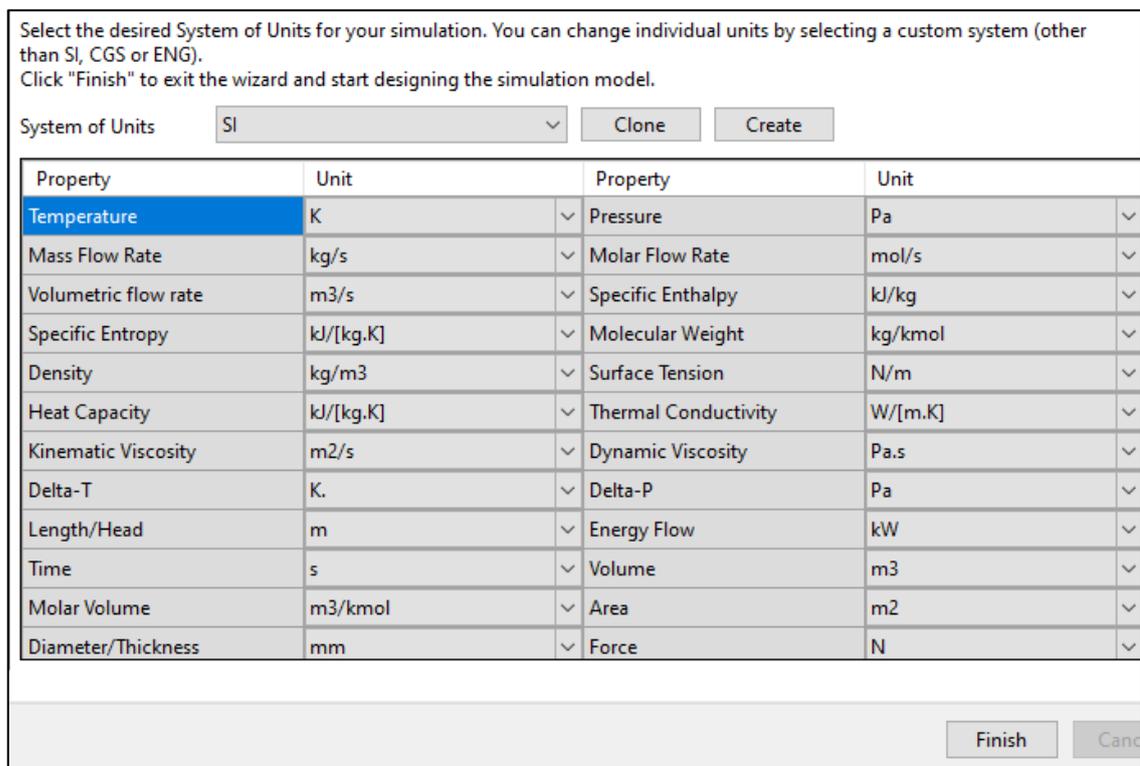


Figura 7-3. Panel para seleccionar los compuestos a utilizar

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

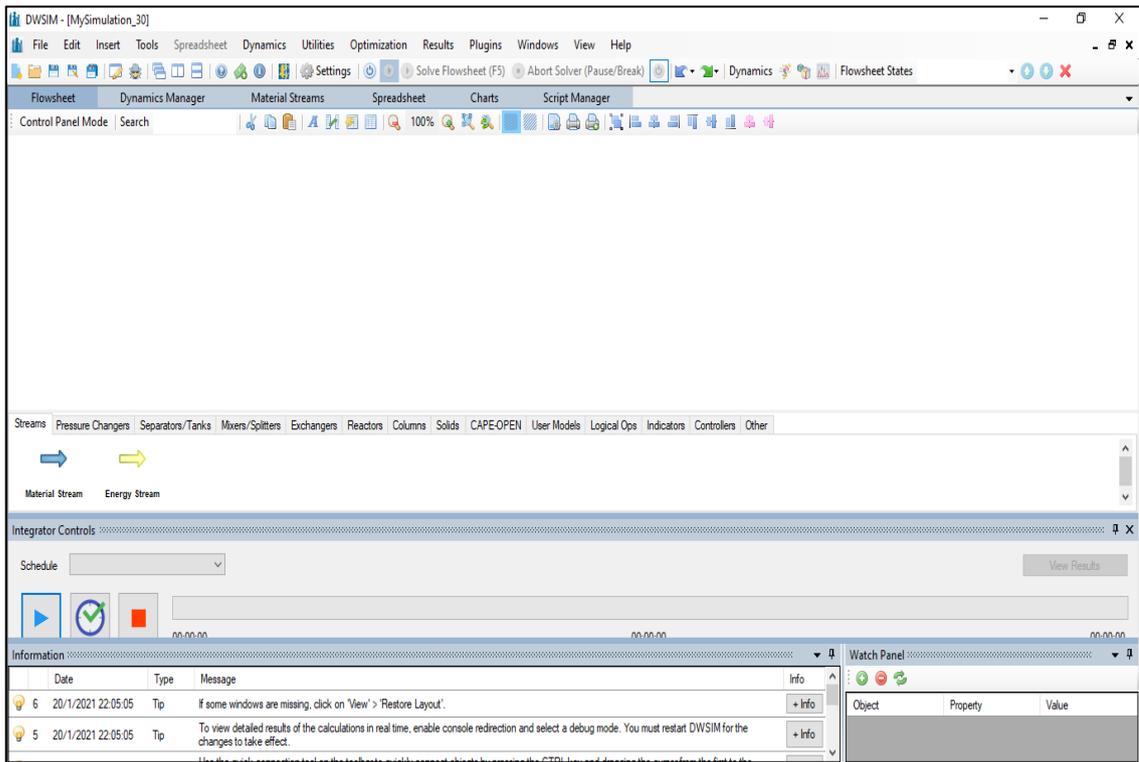


Figura 8-3. Ventana general del simulador DWSIM

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

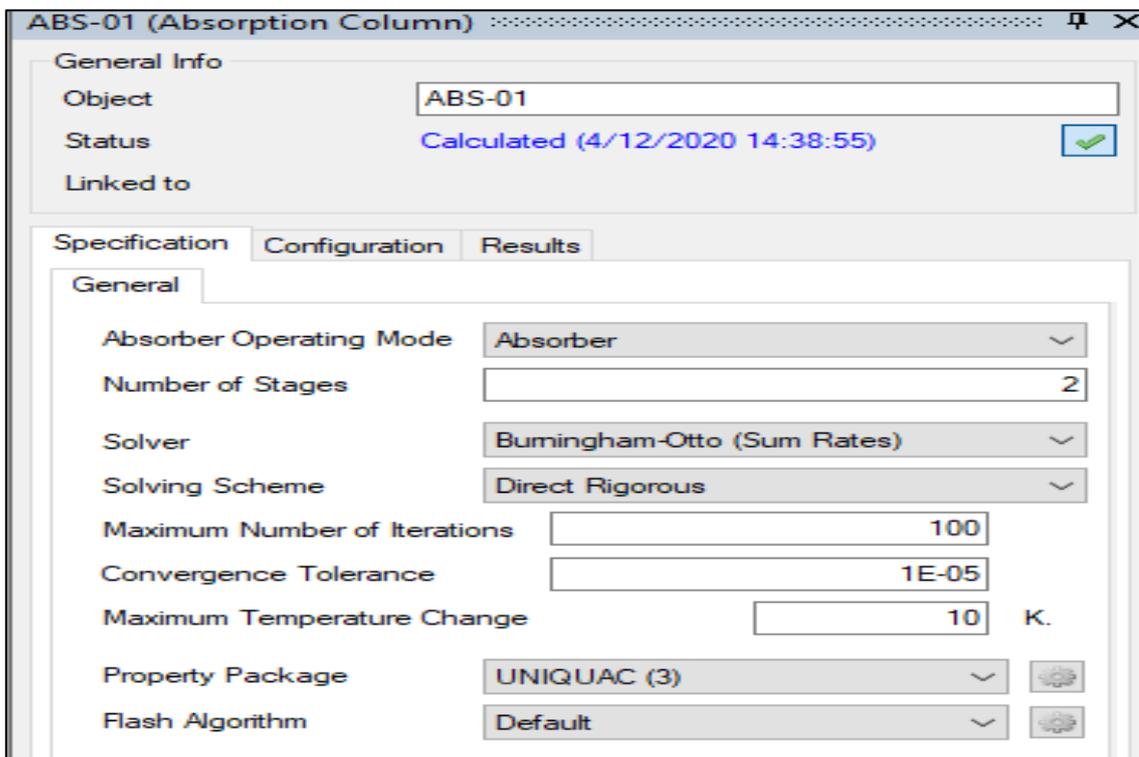


Figura 9-3. Panel para especificar el número de platos del absorbedor

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

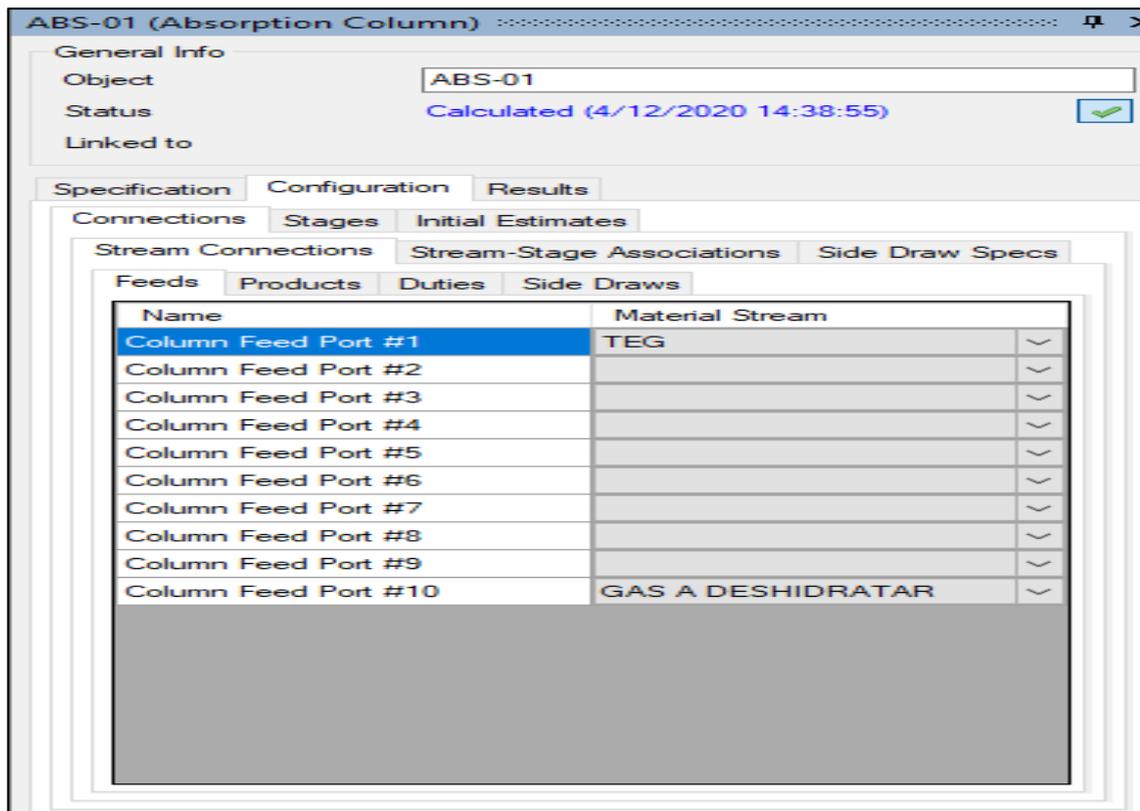


Figura 10-3. Panel especificar el puerto de las corrientes de entrada

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

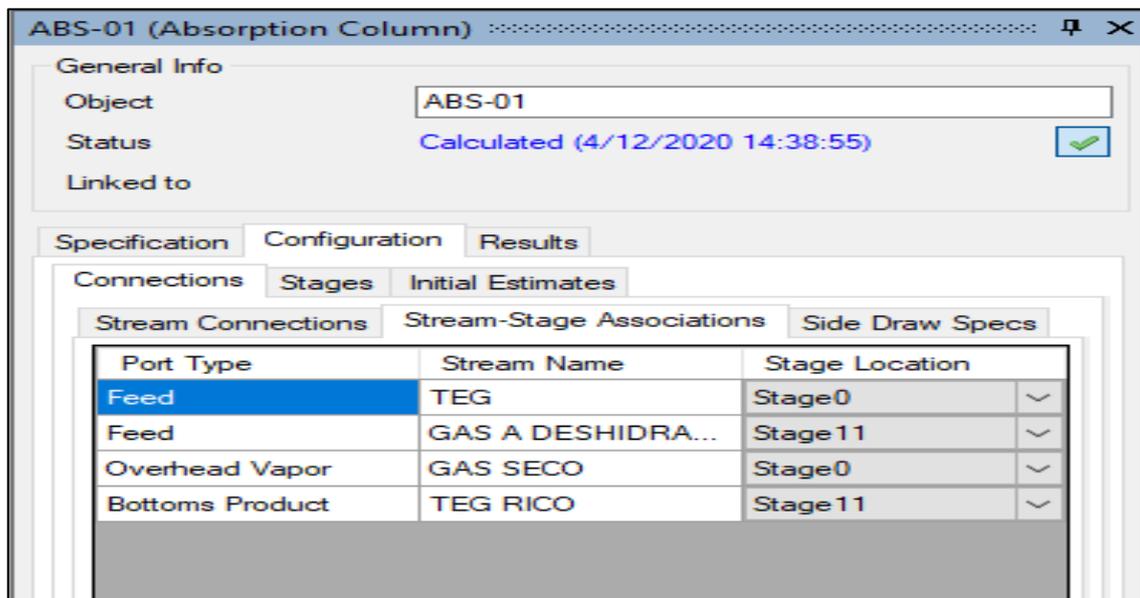


Figura 11-3. Panel definir el plato en cada corriente de entrada y salida

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Nota: En la figura 10-3 y 11-3 se observan más platos de los especificados, pero se debe a un error propio del programa.

Specification		Configuration		Results	
Connections		Stages		Initial Estimates	
Stage	Name	Pressure (Pa)	Efficiency		
0	Stage0	4137000	1		
1	Stage11	4137000	1		

Figura 12-3. Panel para especificar la presión en cada plato

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

SEP-01 (Gas-Liquid Separator)

General

Object: SEP-01

Status: Calculated (4/12/2020 14:38:55)

Linked to:

Connections

Inlet Stream 1: []

Inlet Stream 2: []

Inlet Stream 3: []

Inlet Stream 4: TEG A SEPARAR

Inlet Stream 5: []

Inlet Stream 6: []

Vapor Stream: HC VOLÁTILES

Light Liquid Stream: TEG RICO 2

Heavy Liquid Stream: []

Energy Stream: ESTR-08

Calculation Parameters

Outlet Pressure Calculation: Inlet Average

Override Sep. Temperature: 298.15 K

Override Sep. Pressure: 532000 Pa

Property Package Settings

Property Package: NRTL (2)

Flash Algorithm: Default

Figura 13-3. Panel para configurar la temperatura y presión del separador

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

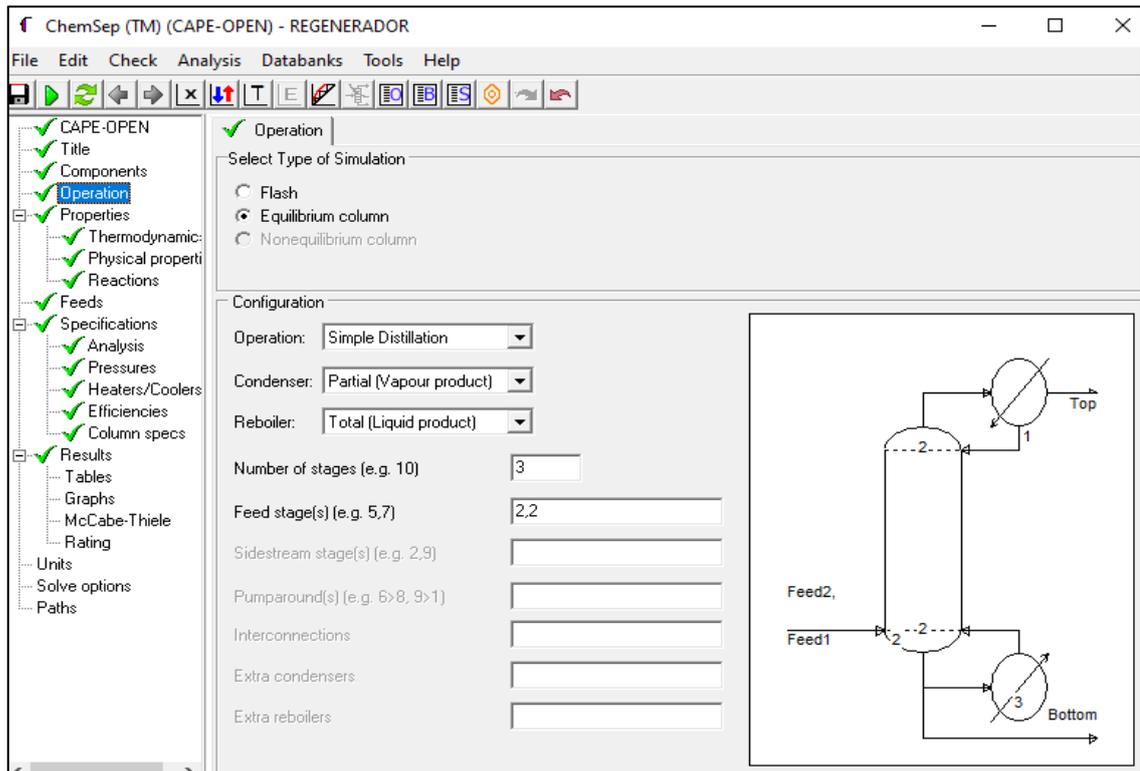


Figura 14-3. Panel de “ChemSep” para configurar el tipo de operación del regenerador

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

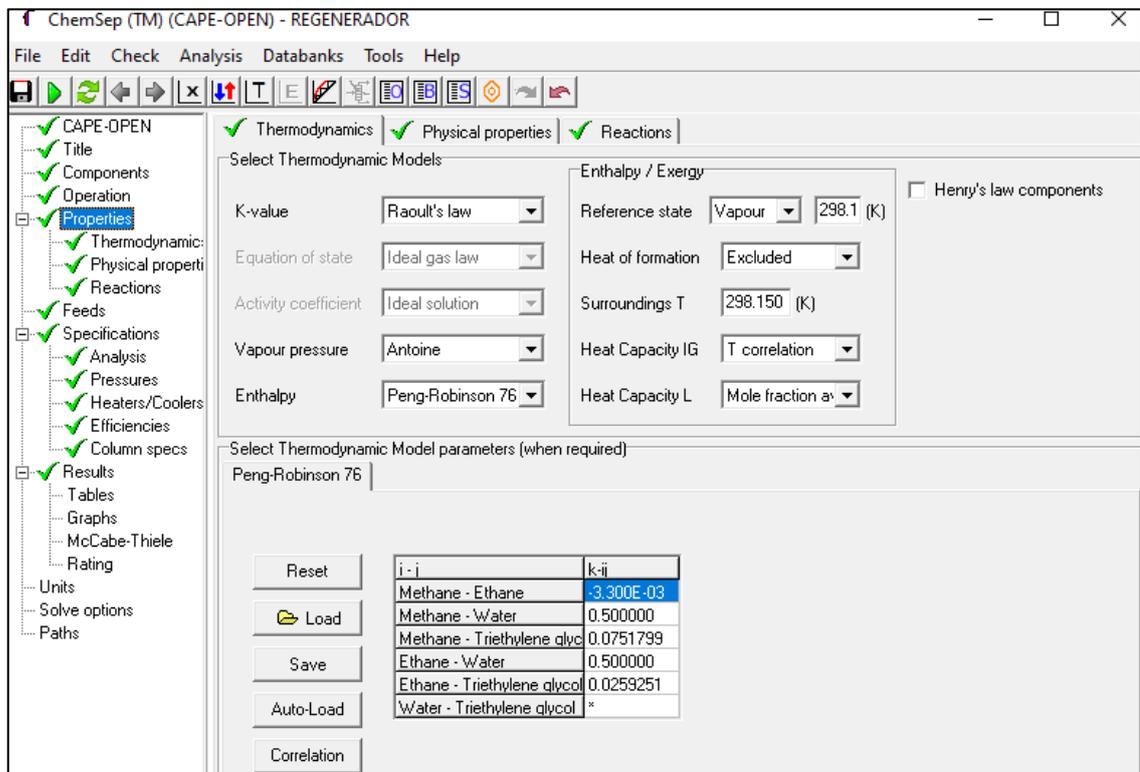


Figura 15-3. Panel para configurar el modelo termodinámico del regenerador

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

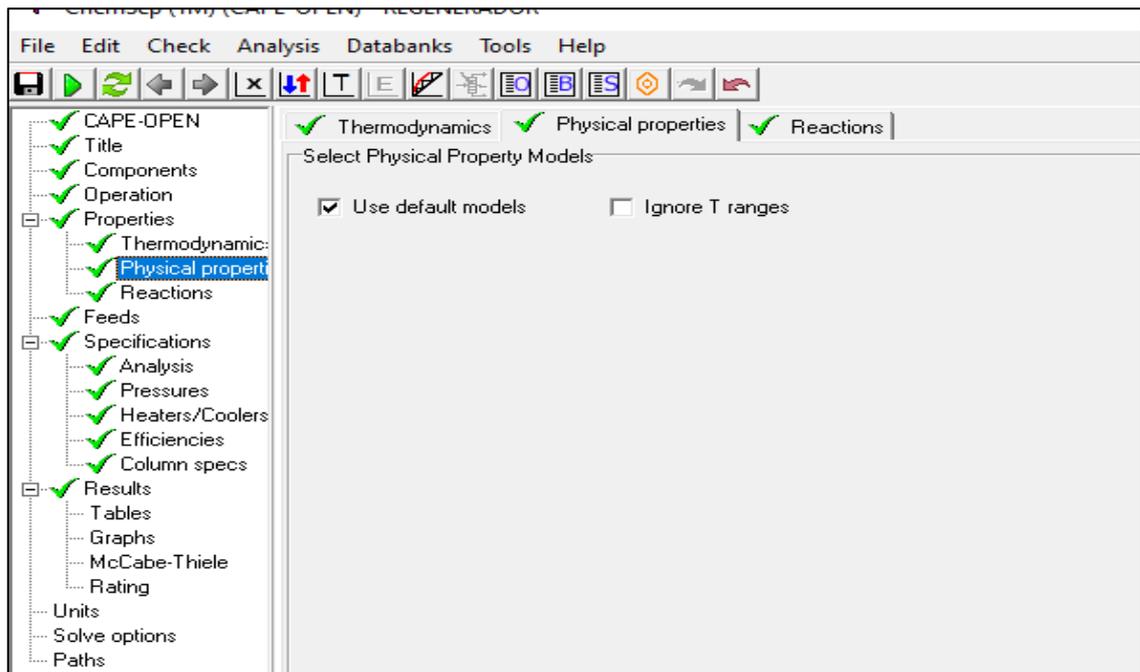


Figura 16-3. Panel para configurar las propiedades físicas del regenerador

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

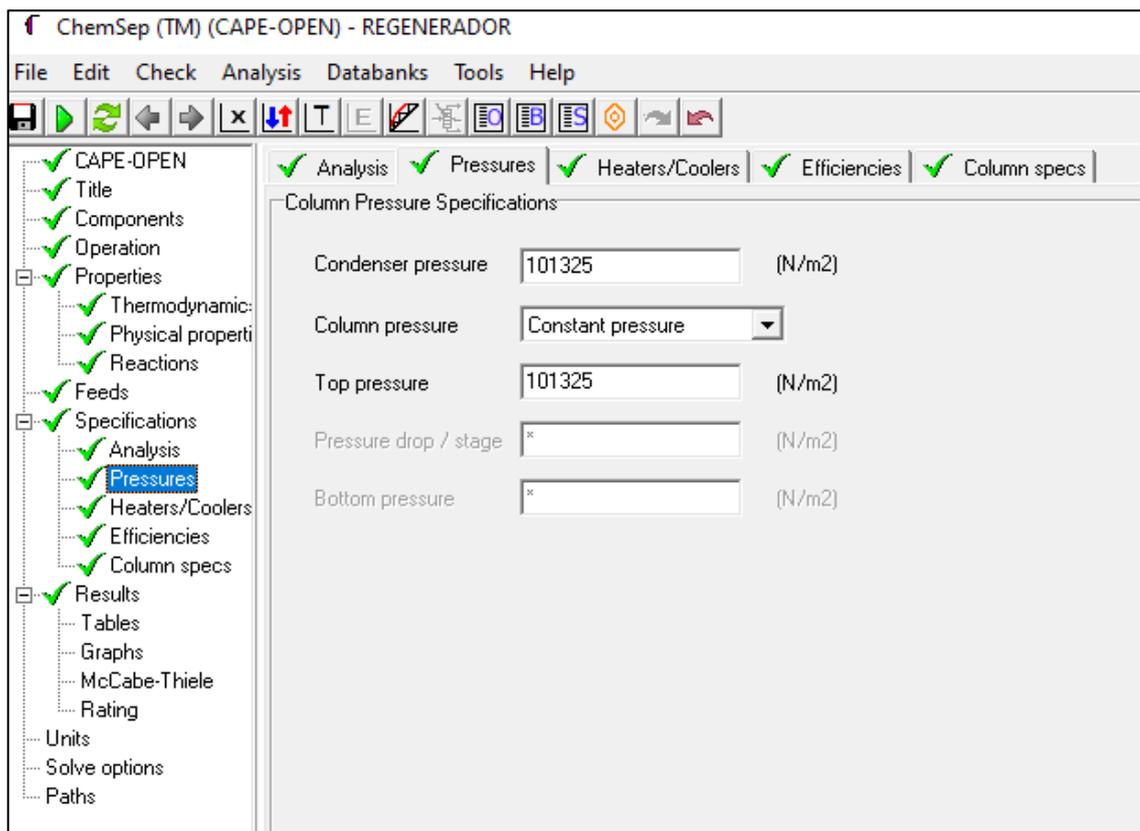


Figura 17-3. Panel para configurar las presiones de trabajo del regenerador

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

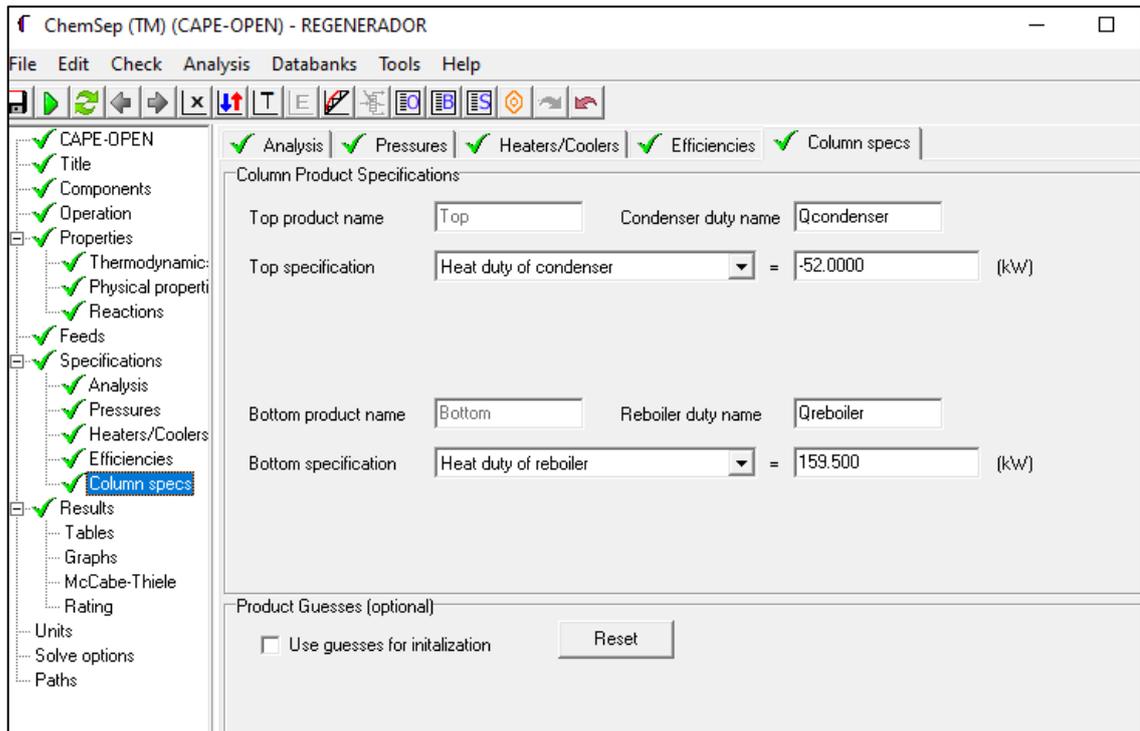


Figura 18-3. Panel para configurar las especificaciones de la columna

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

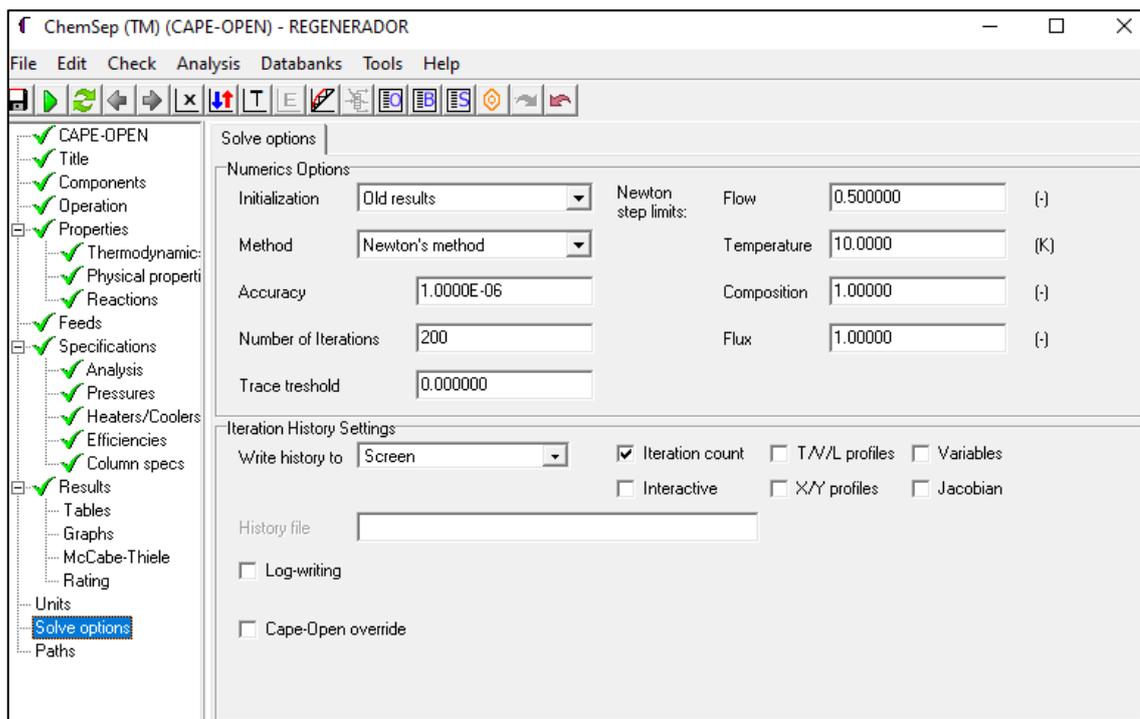


Figura 19-3. Especificación de las opciones numéricas de resolución

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

HEAT-01 (Heater)

General Info

Object: HEAT-01

Status: Calculated (4/12/2020 14:38:55)

Linked to:

Connections

Inlet Stream: TEG RICO 2

Outlet Stream: TEG A REGENERAR

Energy Stream: ESTR-01

Calculation Parameters

Calculation Type: Energy Stream

Pressure Drop: 0 Pa

Efficiency (0-100%): 100

Outlet Temperature: 426.202 K

Temperature Change: 101.696 K

Outlet Vapor Fraction: 0

Heating/Cooling: 201.299 kW

Property Package Settings

Property Package: Peng-Robinson (PR) (1)

Flash Algorithm: Default

Figura 20-3. Panel para configurar tanto los heaters como los coolers

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

PUMP-01 (Pump)

General Info

Object: PUMP-01

Status: Calculated (4/12/2020 14:39:01)

Linked to:

Connections

Inlet Stream: TEG A RECIRCULAR

Outlet Stream: TEG A ENFRIAR

Energy Stream: ESTR-06

Calculation Parameters

Calculation Type: Outlet Pressure

Pressure Increase: 4.03568E+06 Pa

Outlet Pressure: 4.137E+06 Pa

Efficiency (0-100%): 75

Outlet Temperature: 350.059 K

Temperature Change: 0.632558 K

Power Required: 3.21188 kW

Performance Curves: Edit Performance Curves

Property Package Settings

Property Package: Peng-Robinson (PR) (1)

Flash Algorithm: Default

Figura 21-3. Panel para configurar la operación de la bomba

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

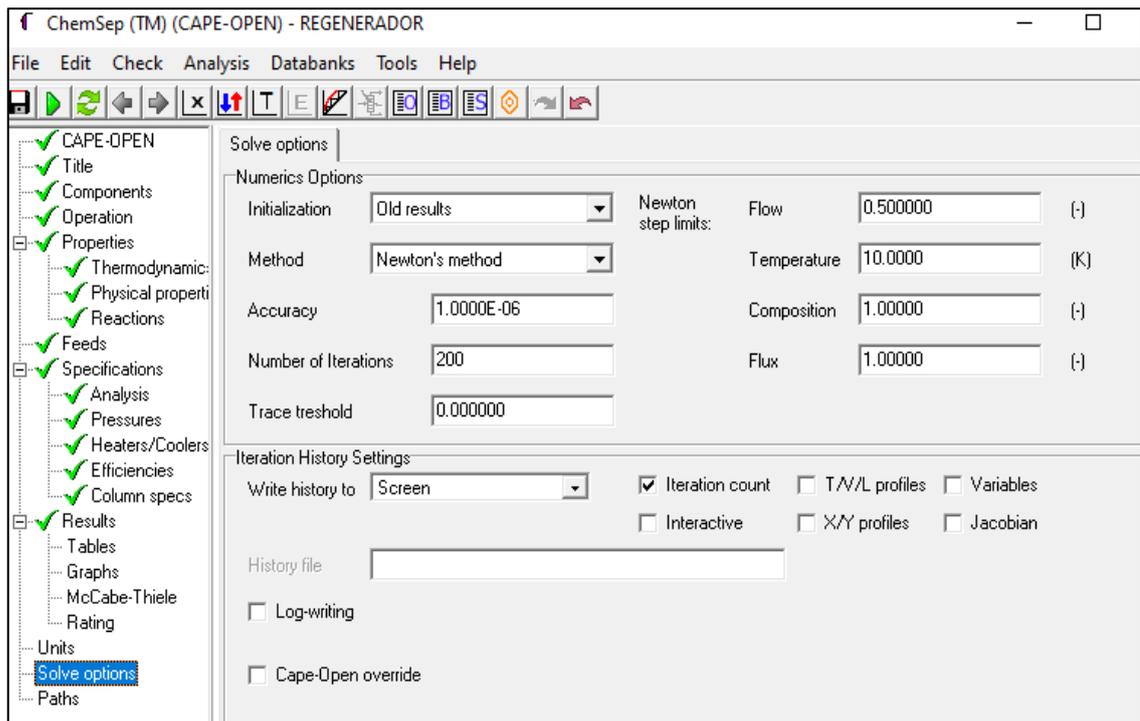


Figura 22-3. Panel para especificar las opciones de solución

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

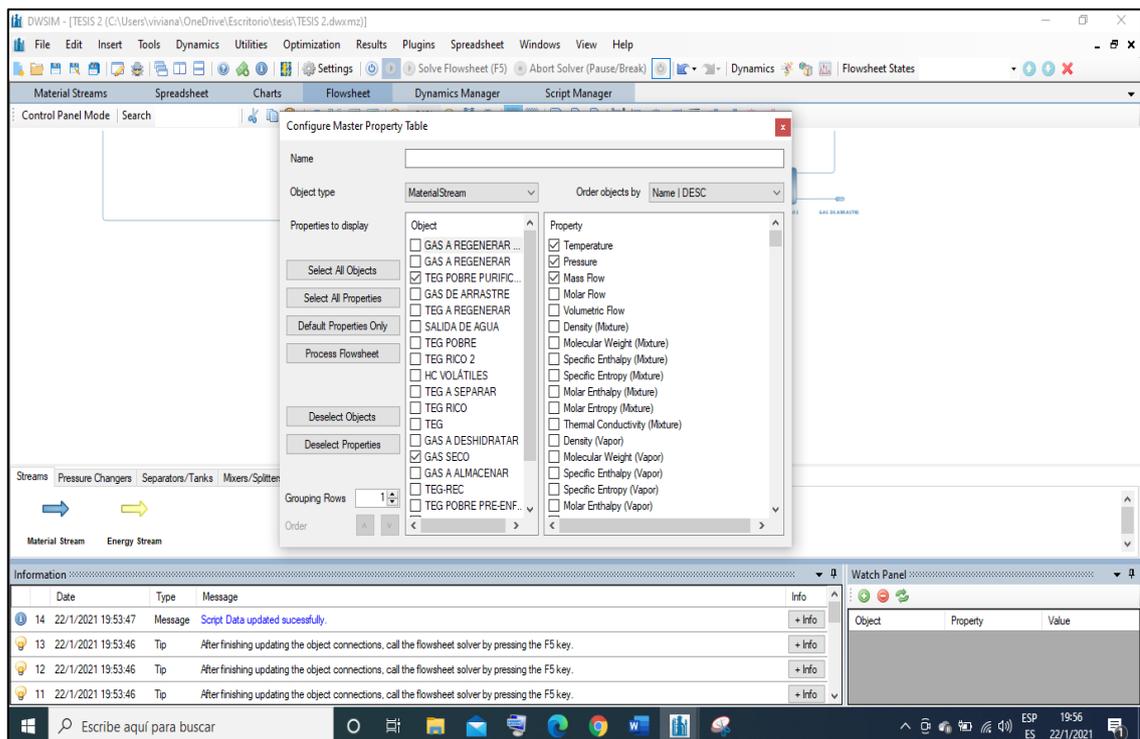


Figura 23-3. Panel para insertar tablas de resultados

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Como se observa en la figura 23-3. El software DWSIM permite insertar tablas de resultados, donde se puede seleccionar líneas de flujo, equipos, etc. Con ello se podrá observar las principales variables del proceso como son la fracción de agua en el gas seco y la pérdida de glicol en la torre de destilación.

3.4. Análisis de sensibilidad

Se tomarán en cuenta 3 variables de salida específicas, las mismas que a criterio personal son las más importantes del proceso: Temperatura de gas seco, fracción de agua en el gas seco y flujo de glicol perdido en el regenerador, mientras que las variables de entrada se las obtendrá a partir de un análisis de sensibilidad mostrado en la tabla 9-3.

Tabla 9-3. Resultados del análisis de sensibilidad

Entradas		Salidas		
Variable	Rango	Temperatura de gas seco (K)	Fracción de agua a la salida	Flujo de glicol perdido (kg/s)
Calor del condensador (kW)	25-100	-	-	0,00074- 1,92E-06
Fracción de agua inicial	0,0001- 0,01	312,307-321,72	4,460E-05-0,00046	0,00047- 7,16E-06
Temperatura inicial del gas (K)	290-417	293,63-415,08	2,05E-05-0,00187	5,29E-06-0,35444
Presión del absorbedor (Pa)	107392-4907126	292,36-317,38	0,00145-0,000118	2,34E-05-1,71E-05
Calor del reboiler (kW)	70-334	-	-	9,13E-07- 0,1551

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

- Se optó por trabajar con una pureza constante del glicol, por lo que se eliminó la recirculación del proceso.
- Tanto el calor del reboiler como el calor del condensador no mostraron influencia en la temperatura de gas seco ni en la fracción de agua a la salida debido a la eliminación de la recirculación.
- De las 5 variables analizadas se seleccionarán las 3 más influyentes.
- Las variables que mostraron más cambio en los resultados respecto a los valores óptimos del proceso son la temperatura inicial del gas, presión del absorbedor y el calor del reboiler.

3.5. Generación de datos

Mediante 100 simulaciones donde se variaban de forma aleatoria las variables de entrada obtenidas del punto anterior se obtuvieron los pares de datos, mismos que servirán para crear la red neuronal.

Tabla 10-3. Variables de entrada de la RNA

Variable	Temperatura de gas húmedo ($T_{\text{gas húmedo}}$)	Presión del absorbedor (P_{abs})	Calor del reboiler (Q_{reb})
Unidad	K	Pa	kW
Rango	290-417	107392- 4907126	70-334

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Nota: Con valores mayores o menores a los establecidos no corre la simulación.

Tabla 11-3. Variables de salida de la RNA

Variable	Miligramos de agua por metro cúbico estándar de gas seco	Temperatura de gas seco ($T_{\text{gas seco}}$)	Flujo másico de TEG (F_{glicol})
Unidad	mg _{agua} /Sm ³ _{gas seco}	K	Kg/s

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Como se observa en la tabla 11-3 la salida que correspondía a la fracción másica de agua en el gas seco se cambió por los miligramos de agua por metro cubico estándar de gas seco mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{mg}_{\text{agua}} / \text{Sm}^3_{\text{gas seco}} = \frac{X_{\text{H}_2\text{O}} * F_{\text{masT}} * 1000000}{\frac{T_{\text{S}} * P_{\text{abs}} * F_{\text{V}}}{T_{\text{gas seco}} * P_{\text{S}}}} \quad (\text{Ec 1-3})$$

Dónde:

$X_{\text{H}_2\text{O}}$ = Fraccion másica de agua en el gas seco.

F_{masT} = Flujo másico de gas total (kg/s).

T_{S} = Temperatura en condiciones estándar (288K)

P_{abs} = Presión del absorbedor (Pa).

F_{V} = Flujo volumétrico de gas seco (m³/s).

$T_{\text{gas seco}}$ = Temperatura de salida de gas seco (K).

P_{S} = Presión en condiciones estándar (101325Pa).

Tabla 12-3. Pares de datos generados para la RNA

Entradas			Salidas		
Q _{reb} (kW)	T _{gas húmedo} (K)	P _{abs} (Pa)	mg _{agua} /Sm ³ _{gas}	T _{gas seco} (K)	F _{glicol} (kg/s)
178	365	1066439	1348,27	354,261	0,14122393
204	414	4422397	1448,81	412,889	0,44465433
125	408	4238835	1434,25	406,691	0,22722968
279	382	1085259	1436,23	371,705	0,46422854
143	345	3000484	748,03	342,132	0,016918803
125	369	648763	1425,22	356,718	0,048748166
120	305	3936194	61,09	307,246	1,68E-06
119	320	4375419	185,06	323,79	5,69E-06
84	380	1693859	1390,40	371,788	0,004880068
111	360	2786993	1092,95	355,825	0,000193347
291	348	744223	1234,20	335,384	0,31542444
110	336	2041035	626,81	329,355	7,36E-06
224	316	892526	349,49	303,426	0,001550739
200	389	639002	1477,74	377,274	0,32030218
300	290	825169	29,66	275,081	0,064163797
212	322	3841643	216,31	323,491	0,003679113
106	330	4598968	333,91	334,094	5,72E-05
100	404	809287	1489,95	393,082	0,15838166
266	363	2398874	1175,88	357,342	0,31448033
206	335	1304236	756,68	324,913	0,019429589
280	351	4402653	798,85	352,983	0,35000876
106	360	3599870	1031,93	358,712	0,013636269
249	387	2304002	1396,51	380,784	0,4129123
282	300	572746	129,62	284,529	0,059260312
275	377	4000000	1253,39	376,274	0,41770669
126	325	4128030	256,73	327,533	9,21E-06
70	312	976289	233,35	299,705	4,89E-07
244	365	2316542	1211,09	359,014	0,27682377
161	340	2329126	693,03	334,536	0,000254161
333	328	3916624	311,00	329,535	0,34136735
334	327	1432666	494,08	317,524	0,20313264
263	347	3097560	788,74	344,432	0,28623065
254	343	4425635	613,03	345,594	0,24336184
77	396	1907056	1444,79	388,515	0,051515113
122	363	3647375	1082,12	361,742	0,051957107

73	381	2431859	1356,50	375,243	0,000757252
213	320	3319339	197,57	319,319	0,002462814
184	338	2242861	651,49	332,209	0,00150375
70	316	1186228	276,32	305,046	5,36E-07
176	324	162420	1236,46	306,857	0,00457874
261	417	4223046	1457,85	415,285	0,39105052
117	399	488309	1493,12	386,879	0,18424796
300	341	170371	1408,04	325,077	0,34371078
206	299	3100080	35,06	297,344	4,21E-05
220	345	1597982	947,03	336,279	0,095577054
294	373	3941145	1211,27	372,264	0,43786386
173	323	4194138	226,04	325,9	7,25E-05
285	359	4646665	957,15	361,276	0,40931602
218	334	2774304	491,99	330,59	0,10906711
195	305	1339763	92,12	294,083	0,000250664
332	350	4907126	753,85	353	0,46629585
133	341	910095	1048,26	329,014	6,74E-05
259	316	2298946	173,81	310,667	0,022676456
261	341	2032073	763,15	334,234	0,1418896
331	304	4322525	56,67	307,971	0,1040466
266	384	533411	1475,74	371,759	0,45279709
291	372	3644982	1212,76	370,368	0,42489452
324	330	3917143	348,07	331,439	0,33162229
105	327	2666713	341,88	323,296	4,31E-06
166	318	1251993	306,90	307,455	1,35E-05
304	316	4594643	136,46	310,899	0,11721893
330	317	2268278	188,98	311,527	0,12981259
180	318	141730	1155,28	300,281	0,000956255
275	307	3170793	75,62	305,781	0,026604322
83	375	2405474	1312,36	369,216	0,0004908
293	347	107392	1464,15	331,132	0,36251497
225	400	938195	1481,95	389,482	0,42983599
237	327	2686305	340,64	323,382	0,030172164
248	316	655053	448,98	302,006	0,023828087
70	390	339928	1493,63	377,137	0,030596124
168	316	3985939	142,55	318,336	2,90E-05
259	368	1101453	1365,70	357,467	0,34646378
137	389	2202300	1410,15	382,452	0,15817227
155	365	2555291	1190,56	359,876	0,070083839

253	361	1391206	1265,32	351,484	0,2865918
108	327	971868	634,65	315,128	3,67E-06
100	382	4672832	1276,83	382,013	0,039324995
228	328	482798	1322,23	334,117	0,18600886
84	315	233504	870,79	297,96	9,47E-07
134	344	4825544	622,07	347,939	0,00467205
180	364	4320819	1060,53	363,916	0,18747061
115	397	3987483	1396,89	395,461	0,14741763
248	322	1209265	413,11	311,318	0,025007037
173	316	1908954	194,27	308,762	1,50E-05
181	335	1694744	660,84	326,783	0,000963547
253	394	2010400	1435,54	386,836	0,45764227
101	359	4060101	985,74	359,333	0,006330503
200	347	223159	1415,30	331,752	0,1347818
104	357	4323897	932,21	358,336	0,005485519
311	359	1528651	1220,52	350,015	0,40636367
298	350	2854772	882,73	346,382	0,39030412
234	327	4854988	280,05	332,265	0,11788334
210	409	4465403	1434,13	408,21	0,43421703
200	388	4642743	1282,77	388,138	0,30362122
100	325	3541528	268,25	325,118	3,61E-06
264	370	1532618	1336,33	361,131	0,36272474
184	335	3495526	469,07	334,52	0,045841503
209	371	1264379	1369,16	361,147	0,24209634
94	375	3870592	1237,31	373,96	0,004577907
231	390	232639	1498,90	376,626	0,42543689

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.6. Creación de la red neuronal artificial (RNA)

Para el diseño de la RNA se toman en cuenta parámetros de entrada y salida, mismos que se especifican en las tablas 9-3 y 10-3.

Para una mejor predicción por parte de la red neuronal, suele resultar conveniente normalizar los valores a fin de tener datos en el rango de 0-1. Los valores que ya estén en ese intervalo no necesitan normalizarse. La normalización se puede realizar en MATLAB o aplicando la ecuación 2-3:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_{\text{real}} - X_{\text{max}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (\text{Ec 2-3})$$

Dónde:

X_{norm} = Valor normalizado.

X_{real} = Valor real a normalizar.

X_{max} = Valor máximo.

X_{min} = Valor mínimo.

Por lo tanto, los valores que se necesitan normalizar del conjunto de datos obtenidos son todas las entradas y las dos primeras variables de salida.

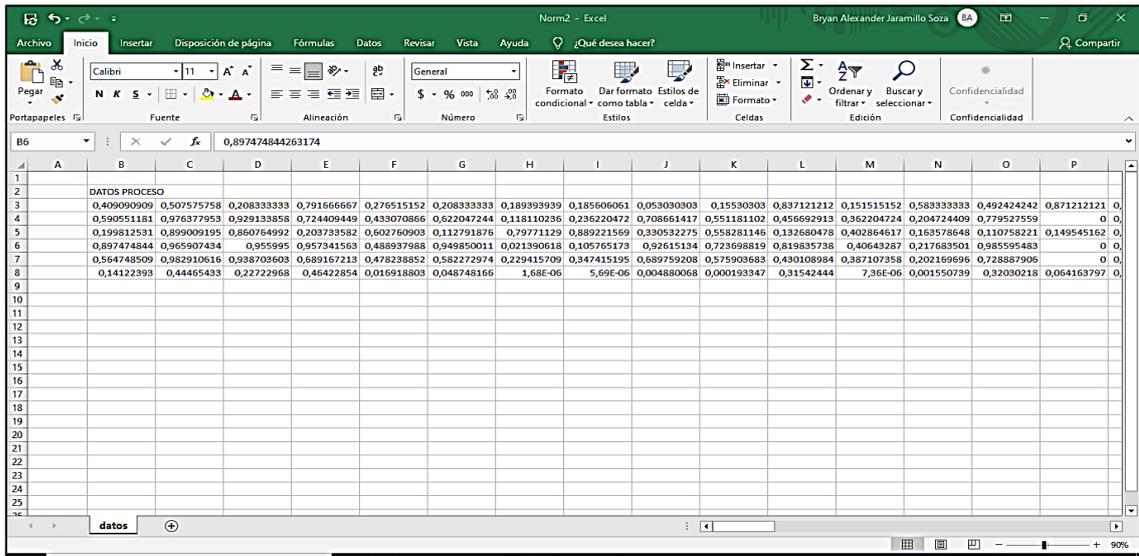


Figura 24-3. Valores normalizados obtenidos en Excel

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

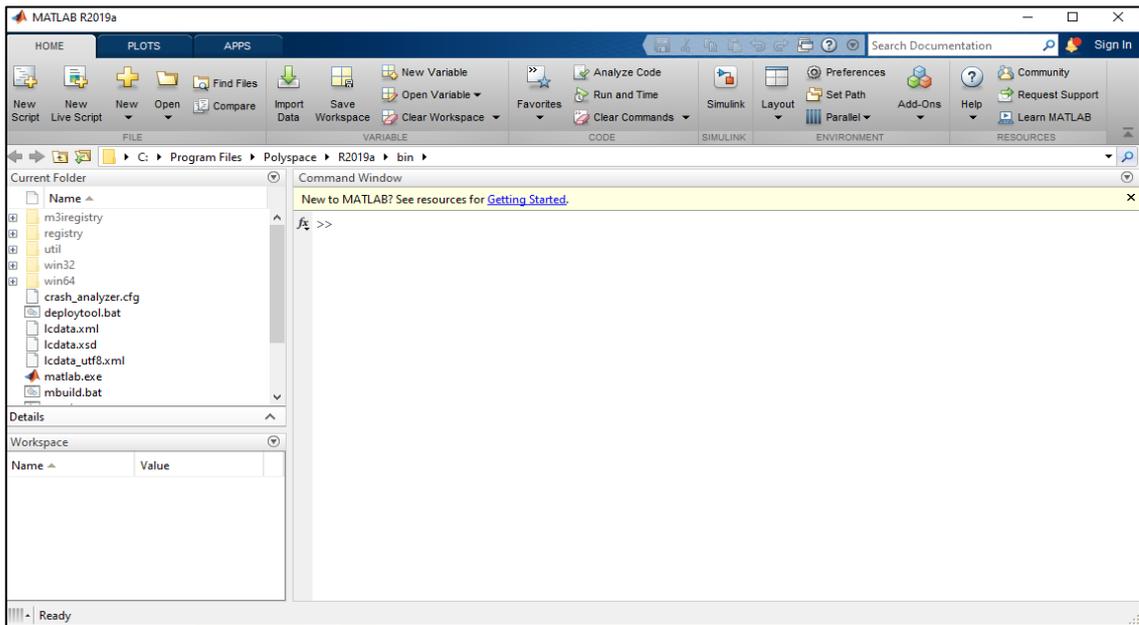


Figura 25-3. Interfaz para escribir el código de la red neuronal

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

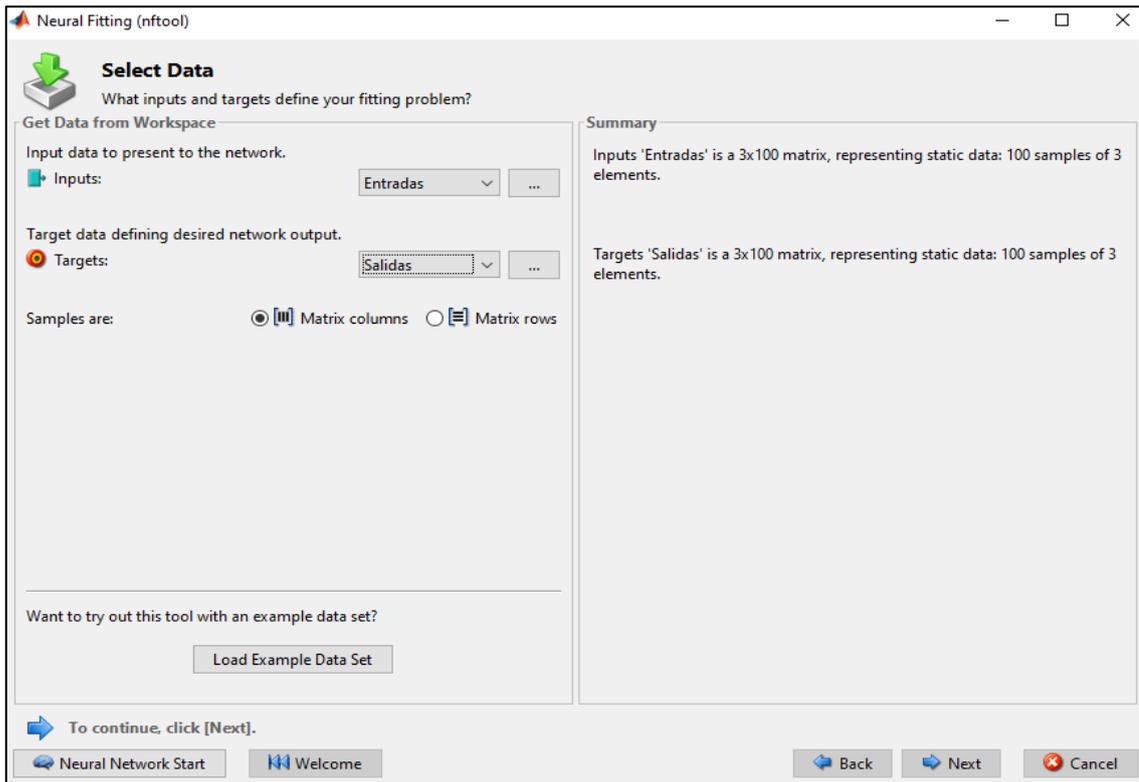


Figura 26-3. Selección de las entradas y salidas de la red

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

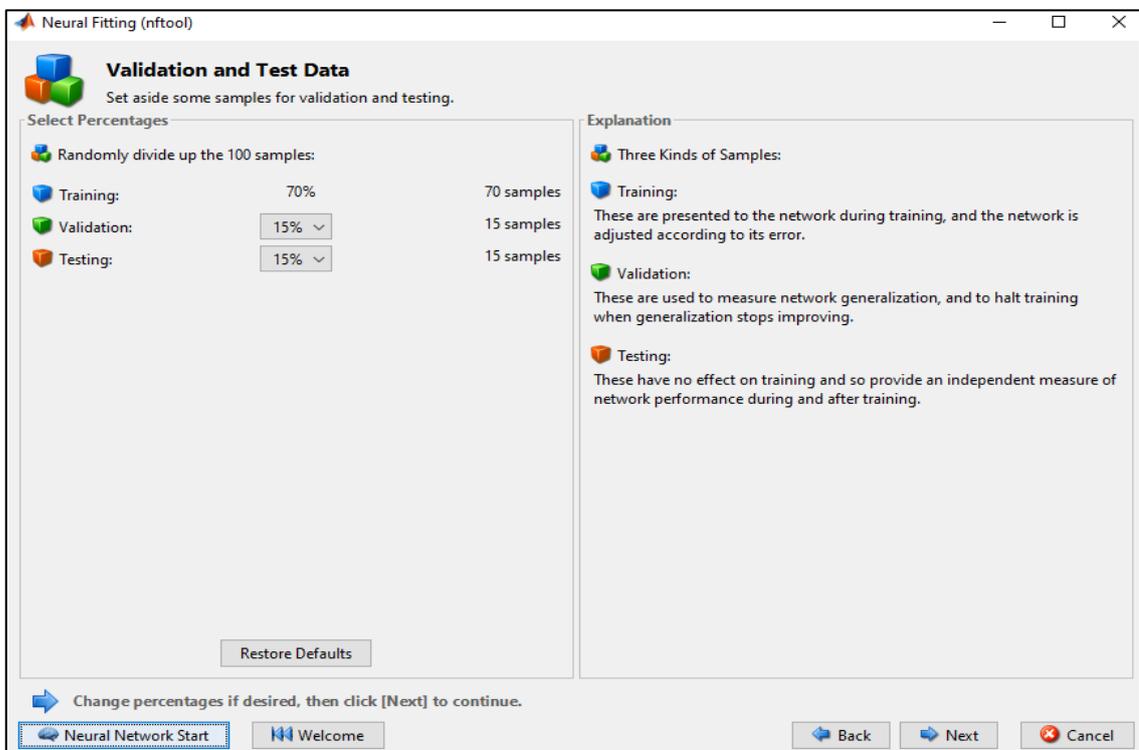


Figura 27-3. Selección del número de datos para el entrenamiento, validación y testeo de la red

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

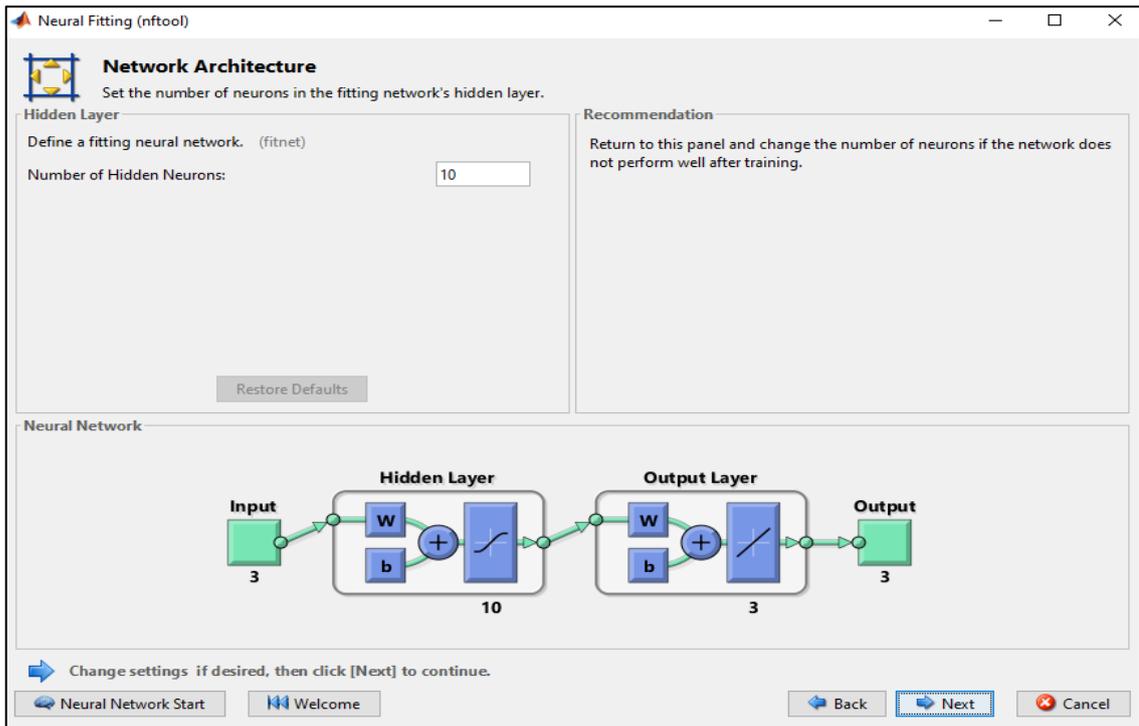


Figura 28-3. Selección del número de neuronas ocultas de la red

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

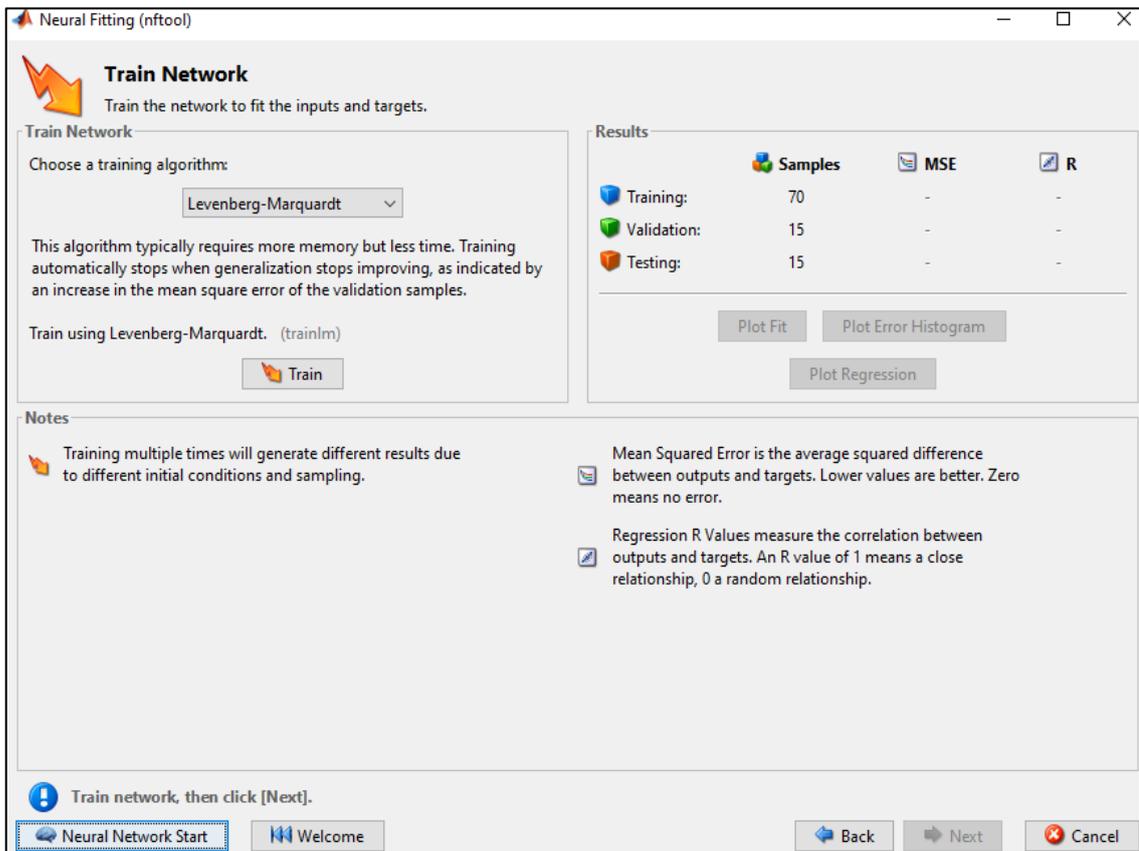


Figura 29-3. Selección del tipo de algoritmo a emplear

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

- Se harán pruebas con 2 tipos de algoritmos: Levenberg-Marquardt y la Regularización Bayesiana.
- Se modificarán el número de neuronas ocultas para ambos algoritmos, hasta encontrar el que genere el menor error cuadrático medio (MSE) y un coeficiente de correlación lineal (R^2) cercano a 1.
- Tanto el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación lineal serán tomados de la fase de evaluación de la red, ya que, si la evaluación presenta buenos parámetros estadísticos, el entrenamiento y la validación también lo tendrán.
- El algoritmo de Regularización Bayesiana no necesita datos para la validación.

Tabla 13-3. Selección de la configuración de la RNA

# De neuronas	Tipo de algoritmo	MSE	R^2
5	Levenberg-Marquardt	7,96E-04	0,99505
	Regularización Bayesiana	1,77E-03	0,99019
6	Levenberg-Marquardt	7,98E-04	0,995789
	Regularización Bayesiana	2,82E-03	0,985314
7	Levenberg-Marquardt	1,96E-03	0,991552
	Regularización Bayesiana	5.3824e-04	0,99746
8	Levenberg-Marquardt	3,67E-03	0,981594
	Regularización Bayesiana	2,04E-03	0,98795
9	Levenberg-Marquardt	7,28E-03	0,968272
	Regularización Bayesiana	2,07E-03	0,989313
10	Levenberg-Marquardt	1,20E-03	0,995165
	Regularización Bayesiana	7,56E-04	0,99711
15	Levenberg-Marquardt	2,31E-03	0,990127
	Regularización Bayesiana	1,25E-03	0,99467
20	Levenberg-Marquardt	2,24E-03	0,990372
	Regularización Bayesiana	1,87E-03	0,990844
25	Levenberg-Marquardt	3,96E-03	0,981439
	Regularización Bayesiana	1,80E-03	0,990063
30	Levenberg-Marquardt	2,91E-03	0,983875
	Regularización Bayesiana	4,59E-04	0,99771
40	Levenberg-Marquardt	1,31E-02	0,942545
	Regularización Bayesiana	4,17E-03	0,981099

50	Levenberg-Marquardt	1,21E-02	0,937706
	Regularización Bayesiana	2,24E-03	988169
60	Levenberg-Marquardt	1,80E-02	0,936347
	Regularización Bayesiana	3,03E-03	0,985936
70	Levenberg-Marquardt	2,56E-02	0,876461
	Regularización Bayesiana	2,59E-03	0,986692
80	Levenberg-Marquardt	9,62E-02	0,709914
	Regularización Bayesiana	3,29E-03	0,985556
90	Levenberg-Marquardt	4,08E-02	0,850579
	Regularización Bayesiana	5,30E-03	0,981523
100	Levenberg-Marquardt	2,97E-02	0,858488
	Regularización Bayesiana	1,93E-03	0,99077

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

En la figura 30-3 se observa la estructura idónea para red neuronal, que consta de 3 capas de entrada, 7 capas ocultas y 3 capas de salida. Las capas de entrada y salida corresponden a las variables mencionadas anteriormente.

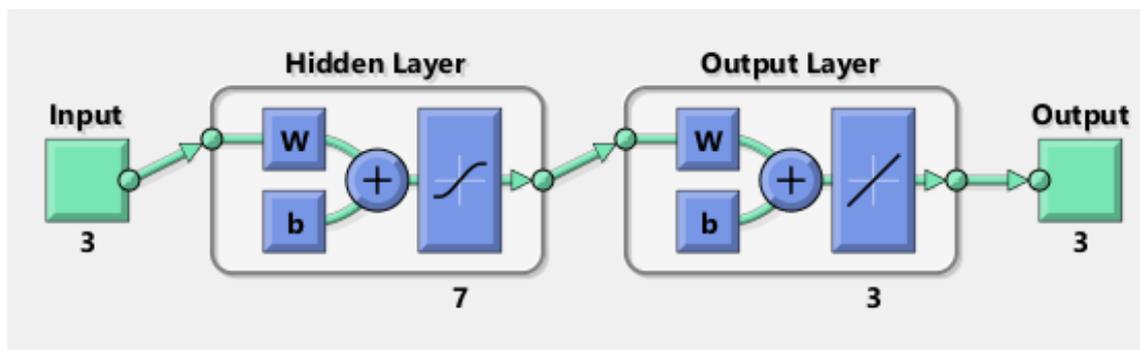


Figura 30-3. Estructura de la RNA

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico servirá para validar la confiabilidad de los resultados predichos de la RNA, MATLAB ya muestra dos parámetros estadísticos básicos que son:

- El error cuadrático medio (MSE): Se considera un buen MSE cuando el valor está cercano a 0.
- El coeficiente de correlación lineal (R^2): Se considera un buen R^2 cuando el valor está cerca del 1.

Aparte, en el presente trabajo se usará un programa estadístico para realizar otras pruebas. Estas pruebas se especificarán de mejor manera en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1. Presupuesto

Tabla 1-4. Presupuesto para el desarrollo del trabajo de integración curricular

PRESUPUESTO			
ACTIVIDAD	MONTO	FUENTE DE FINANCIAMIENTO	
		INTERNA	EXTERNA
Investigación y aprendizaje	\$50	X	
Impresión del documento final	\$30	X	
Copias e impresiones adicionales	\$20	X	
Empastados	\$30	X	
TOTAL		\$130	

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

4.2. Recursos materiales

Para la elaboración del presente trabajo de titulación se utilizaron las siguientes herramientas informáticas:

- *Software DWSIM (versión 6.1 update 4)*: Empleado para realizar la simulación del proceso de deshidratación de gas natural por absorción con TEG.
- *Herramienta CAPE-OPEN*: Complemento de DWSIM, esencial para simular la torre de destilación.
- *Software MATLAB (versión R2019a)*: Empleado para la creación de la RNA.
- *Programa estadístico*: Empleado para validar los resultados de la simulación y de la RNA.

4.3. Cronograma

Tabla 2-4. Cronograma del Trabajo de integración Curricular

ACTIVIDAD	MESES																							
	OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO				MARZO			
	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 bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Elaboración del anteproyecto			■	■	■	■	■	■																
Determinación de variables									■	■	■	■												
Simulación del proceso							■	■	■	■	■	■	■	■										
Obtención de datos experimentales											■	■	■	■										
Validación del método													■	■	■	■	■							
Estudio técnico y económico															■	■	■	■	■					
Redacción del trabajo final													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Análisis de costos																			■	■				
Revisión del documento final																						■		
Defensa de los resultados																								■

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

4.4. Discusión y análisis de resultados

4.4.1. Resultados de la simulación en DWSIM

A continuación, en la tabla 3-4 se muestran algunos resultados que se obtuvieron en las líneas de flujo más importantes del proceso simulado en DWSIM.

Tabla 3-4. Resultados de las líneas de flujo más importantes de la simulación

Línea de flujo	TEG-REC	SALIDA DE AGUA	GAS A ALMACENAR
Temperatura (K)	319,127	372,089	314,085
Presión (Pa)	4137000	101325	4137000
Flujo másico total (Kg/s)	0,643512	0,0370595	19,1562
Fracción másica de metano	1,33327E-07	0,0684711	0,843517
Flujo másico de metano (Kg/s)	8,57975E-08	0,002537505	16,15858036
Fracción másica de etano	1,81371E-08	0,0127155	0,156358
Flujo másico de etano (Kg/s)	1,16714E-08	0,00047123	2,99522512
Fracción másica de agua	0,00494508	0,918428	0,00012338
Flujo másico de agua (Kg/s)	0,003182218	0,034036482	0,002363492
Fracción másica de TEG	0,995055	0,000385344	1,25944E-06
Flujo másico de TEG (Kg/s)	0,640329833	1,42807E-05	2,41261E-05

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Para la validación de los resultados de DWSIM se tomará en cuenta lo siguiente:

- Se validarán las mismas líneas de flujo seleccionadas anteriormente.
- Para la línea TEC-REC se tomará en cuenta la temperatura, flujo másico total, y fracción de TEG.
- Para la SALIDA DE AGUA se validará la temperatura, flujo másico total, flujo másico de agua y de TEG.
- Por último, para el GAS A ALMACENAR se tomará en cuenta la temperatura, flujo másico total, fracción de agua y la suma de las fracciones de los hidrocarburos.

4.5. Validación de los resultados de DWSIM

En todo trabajo de simulación, es importante realizar la validación de los resultados en base a un artículo científico de relevancia. Para el presente trabajo se hizo la validación con los resultados expuestos por (Chebbi et al., 2019, p.728).

El análisis estadístico empleando para la validación será el error porcentual, cuya fórmula es:

$$\%E = \frac{\text{Valor real} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor real}}$$

(Ec 1-4)

Tabla 4-4. Comparación de los valores del artículo con los simulados en DWSIM

Línea de flujo	TEG-REC	SALIDA DE AGUA	GAS A ALMACENAR
Temperatura DWSIM	319,127	372,089	314,085
Temperatura ARTÍCULO	319,3	372	314,1
%ERROR	0,054181021	0,023924731	0,004775549
Flujo másico total DWSIM	0,643512	0,0370595	19,1562
Flujo másico total ARTÍCULO	0,6434	0,037	19,1566
%ERROR	0,017407523	0,160810811	0,002088053
Fracción másica de los hidrocarburos DWSIM	-	-	0,99987536
Fracción másica de los hidrocarburos ARTÍCULO	-	-	0,9998673
%ERROR	-	-	0,000806107
Fracción másica de agua DWSIM	-	-	0,00012338
Fracción másica de agua ARTÍCULO	-	-	0,0001302
%ERROR	-	-	5,238456221
Flujo másico de TEG DWSIM	-	1,43E-05	-
Flujo másico de TEG ARTÍCULO	-	2,64E-06	-
%ERROR	-	4,41E+02	-
Flujo másico de agua DWSIM	-	0,03403646	-
Flujo másico de agua ARTÍCULO	-	0,033917189	-
%ERROR	-	0,351653552	-
Fracción másica de TEG DWSIM	0,99505477	-	-
Fracción másica de TEG ARTÍCULO	0,9950041	-	-
%ERROR	0,005092441	-	-

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

- Se puede observar en la tabla 4-4 que la mayoría de los errores porcentuales no sobrepasan el 10%, a excepción del flujo másico de TEG que sale en la corriente “SALIDA DE AGUA”, debido a que, en la corriente, la principal variable es el agua, aunque no se descarta que haya trazas de TEG por lo que el error puede salir muy elevado, pero, se considera aceptable.
- Algunas variables no se tomaron en cuenta en todas las corrientes analizadas por lo que se dejó la celda marcada con un guion.
- La fracción de hidrocarburos corresponde a la suma de las fracciones del metano y del etano. La combinación de modelos termodinámicos y cambios necesarios que se hicieron conllevaron a que se realice una correcta simulación del proceso, por lo tanto, se considera que la simulación está validada respecto al diseño presentado por Chebbi et al. (2019, p.727), de la misma manera se aprueba el funcionamiento para la generación de los datos que servirán para crear la RNA.

4.6. Balance de masa del sistema

El balance de masa que se realizará tendrá como objetivo demostrar la valides del sistema mediante cálculos matemáticos manuales. Se analizará los siguientes equipos:

- La torre de absorción.
- El separador 1
- La torre de destilación
- El separador 2

Para cada equipo se determinarán los flujos másicos correspondientes.

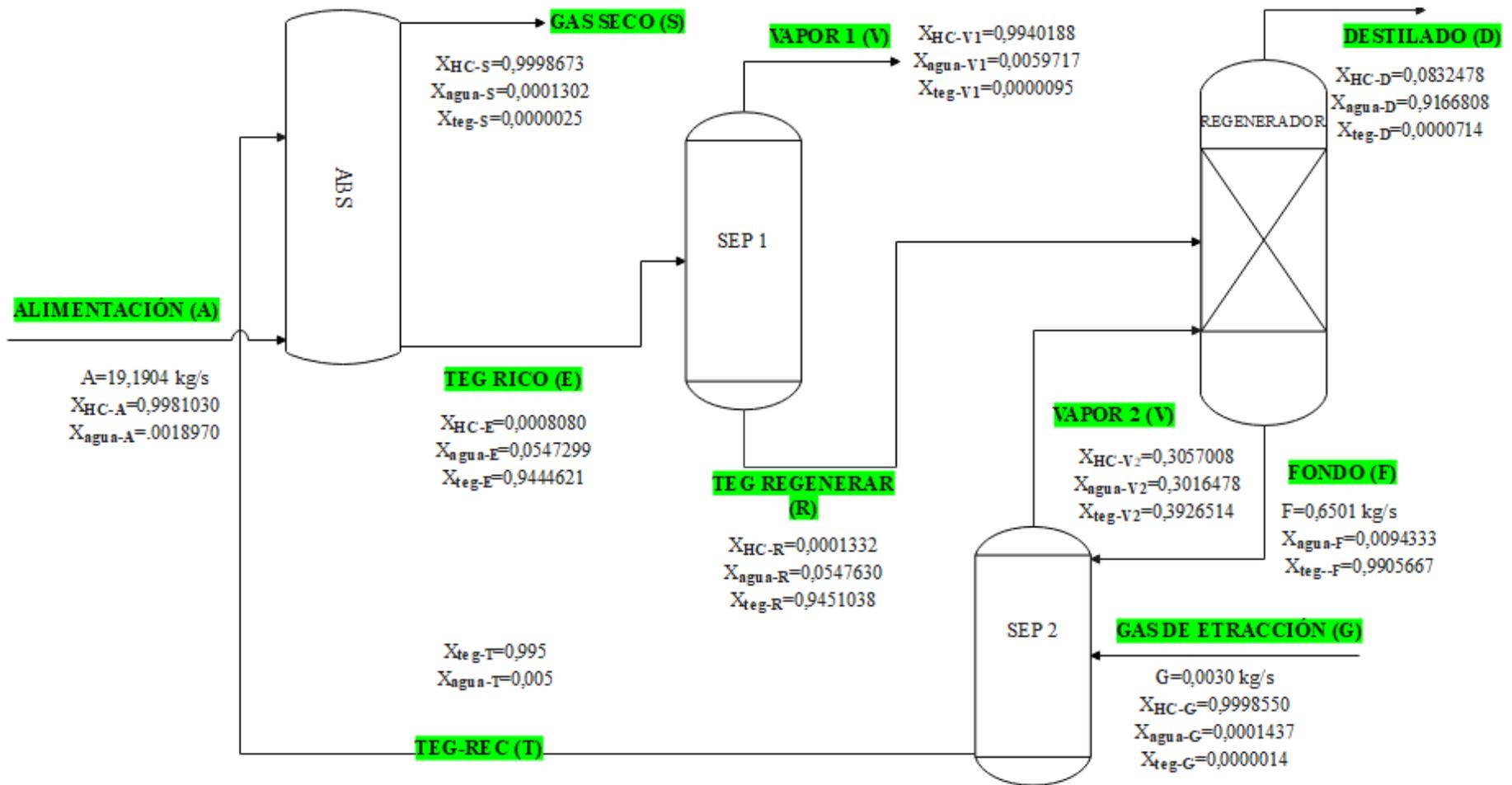


Figura 1-4. Diagrama de flujo para el balance de masa

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

4.6.1. Balance de masa para el separador 2

4.6.1.1. Balance global del equipo

(Ec 2-4)

$$F + G = V_2 + T$$

Dónde:

F= Flujo másico de los fondos del regenerador.

G= Flujo másico de gas de extracción.

V₂= Flujo másico del vapor del separador 2.

T= Flujo másico del TEG a recircular

$$0,6501 + 0,0030 = V_2 + T$$

$$T = 0,6531 - V_2 \quad (\text{Ec 3-4})$$

4.6.1.2. Balance de masa por componente (HC)

$$X_{\text{HC-F}} * F + X_{\text{HC-G}} * G = X_{\text{HC-T}} * T + X_{\text{HC-V}_2} * V_2 \quad (\text{Ec 4-4})$$

Dónde:

X_{HC-F}= Fracción másica de los hidrocarburos en los fondos del regenerador.

X_{HC-G} = Fracción másica de los hidrocarburos en el gas de extracción.

X_{HC-V₂} = Fracción másica de los hidrocarburos en el vapor del separador.

X_{HC-T} = Fracción másica de los hidrocarburos en el TEG a recircular.

Reemplazando valores y despejando V₂ tenemos:

$$0 * F + 0,999855 * 0,003 = 0 * T + 0,3057008 * V_2$$

$$V_2 = \frac{0,999855 * 0,003}{0,3057008}$$

$$V_2 = 0,009812 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reemplazando en la ecuación 3-4

$$T = 0,6531 - 0,009812$$

$$T = 0,6433 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.6.2. Balance de masa para la torre de absorción

4.6.2.1. Balance global del equipo

$$A + T = S + E \quad (\text{Ec 5-4})$$

Dónde:

A= Flujo másico de la alimentación.

S= Flujo másico de gas seco.

E= Flujo masico de TEG rico.

$$19,1904 + 0,6433 = S + E$$

$$S = 19,8337 - E \quad (\text{Ec 6-4})$$

4.6.2.2. Balance de masa por componentes (HC)

$$X_{\text{HC-A}} * A + X_{\text{HC-T}} * T = X_{\text{HC-S}} * S + X_{\text{HC-E}} * E \quad (\text{Ec 7-4})$$

Dónde:

$X_{\text{HC-A}}$ = Fracción másica de los hidrocarburos en la alimentación

$X_{\text{HC-S}}$ = Fracción másica de los hidrocarburos en el gas seco

$X_{\text{HC-E}}$ = Fracción másica de los hidrocarburos en el TEG rico

Reemplazando valores y despejando E tenemos:

$$0,9981030 * 19,1904 + 0 * T = 0,9998673 * S + 0,0008080 * E$$

$$E = \frac{0,9981030 * 19,1904 - 0,9998673 * S}{0,0008080} \quad (\text{Ec 8-4})$$

Reemplazando la ecuación 6-4 en la 8-4 tenemos:

$$E = \frac{0,9981030 * 19,1904 - 0,9998673 * (19,8337 - E)}{0,0008080}$$

$$0,0008080 * E = 0,9981030 * 19,1904 - 0,9998673 * 19,8337 + 0,9998673 * E$$

$$E = \frac{-0,6771}{-0,9991}$$

$$E = 0,6777 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reemplazando en la ecuación 6-4 tenemos:

$$S = 19,8337 - 0,6777$$

$$S = 19,156 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.6.3. Balance de masa para el separador 1

4.6.3.1. Balance global del equipo

$$E = V_1 + R \quad (\text{Ec 9-4})$$

Dónde:

V_1 = Flujo másico del vapor del separador 1

R = Flujo másico del TEG a regenerar

$$0,6777 = V_1 + R$$

$$R = 0,6777 - V_1 \quad (\text{Ec 10-4})$$

4.6.3.2. Balance de masa por componentes (TEG)

$$X_{\text{TEG-E}} * E = X_{\text{TEG-V}_1} * V_1 + X_{\text{TEG-R}} * R \quad (\text{Ec 11-4})$$

Dónde:

$X_{\text{TEG-E}}$ = Fracción másica de glicol en el TEG rico.

$X_{\text{TEG-V}_1}$ = Fracción másica de glicol en el vapor del separador 1.

$X_{\text{TEG-R}}$ = Fracción másica de glicol en el glicol a regenerar.

Reemplazando valores y despejando V_1 tenemos:

$$0,9444621 * 0,6777 = 0,0000095 * V_1 + 0,9451038 * R$$

$$V_1 = \frac{0,9444621 * 0,6777 - 0,9451038 * R}{0,0000095} \quad (\text{Ec 12-4})$$

Reemplazando la ecuación 10-4 en la ecuación 12-4 tenemos

$$V_1 = \frac{0,9444621 * 0,6777 - 0,9451038 * (0,6777 - V_1)}{0,0000095}$$

$$0,0000095 * V_1 = 0,9444621 * 0,6777 + 0,9451038 * V_1 - 0,6777 * 0,9451038$$

$$V_1 = \frac{-0,00043488}{-0,9450943}$$

$$V_1 = 0,00046 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reemplazando en la ecuación 10-4

$$R = 0,6777 - 0,00046$$

$$R = 0,6765 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.6.4. Balance de masa para el regenerador

4.6.4.1. Balance global del equipo

$$R + V_2 = F + D \quad (\text{Ec 13-4})$$

Dónde:

V_2 = Flujo másico de vapor del separador 2.

D= Flujo másico de destilado del regenerador.

Reemplazando los valores tenemos:

$$0,6765 + 0,009812 = 0,6501 + D$$

$$D = 0,0362 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.7. Resultados de la predicción de la red neuronal artificial (RNA)

Tabla 5-4. Error cuadrático medio (MSE) en el diseño de la RNA

Etapa	MSE
Trainperformance (entrenamiento)	6.5977e-04
Valperformance (validación)	NaN
Testperformance (evaluación)	5.3824e-04

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

En la tabla 5-4 se puede observar los valores que representan el MSE para las tres fases: entrenamiento, validación y evaluación. Las redes que utilizan el algoritmo de la regularización Bayesiana no presentan la etapa de validación por lo que ese error no presenta valor.

Cómo se explicó en el capítulo anterior, mientras cercanos estén los valores del MSE al 0, se considera una buena red neuronal, en este caso, los valores de 5.4981e-04 y 6.2460e-04 para el entrenamiento y evaluación respectivamente se toman como valores aceptables para el desempeño de la RNA.

4.7.1. Gráficos de desempeño de la RNA

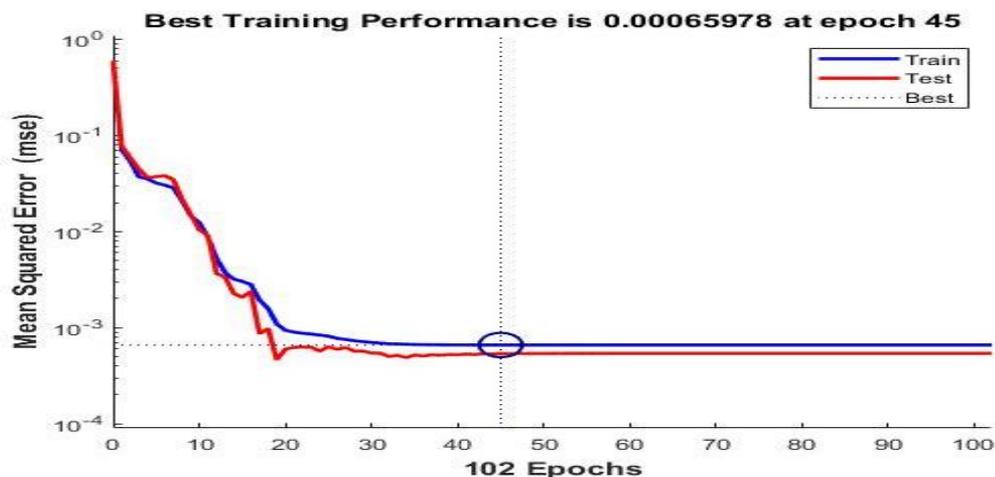


Gráfico 1-4. Evolución del MSE en la RNA

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

En la gráfica 1-4 se muestra el error cuadrático medio que se obtiene en la etapa de entrenamiento que es de 0,00065978. El MSE está cercano a 0, por lo tanto, es aceptable. Cuando las líneas de entrenamiento (azul) y de evaluación (roja) están cercanas, se demuestra que existe una buena capacidad predictiva de la RNA.

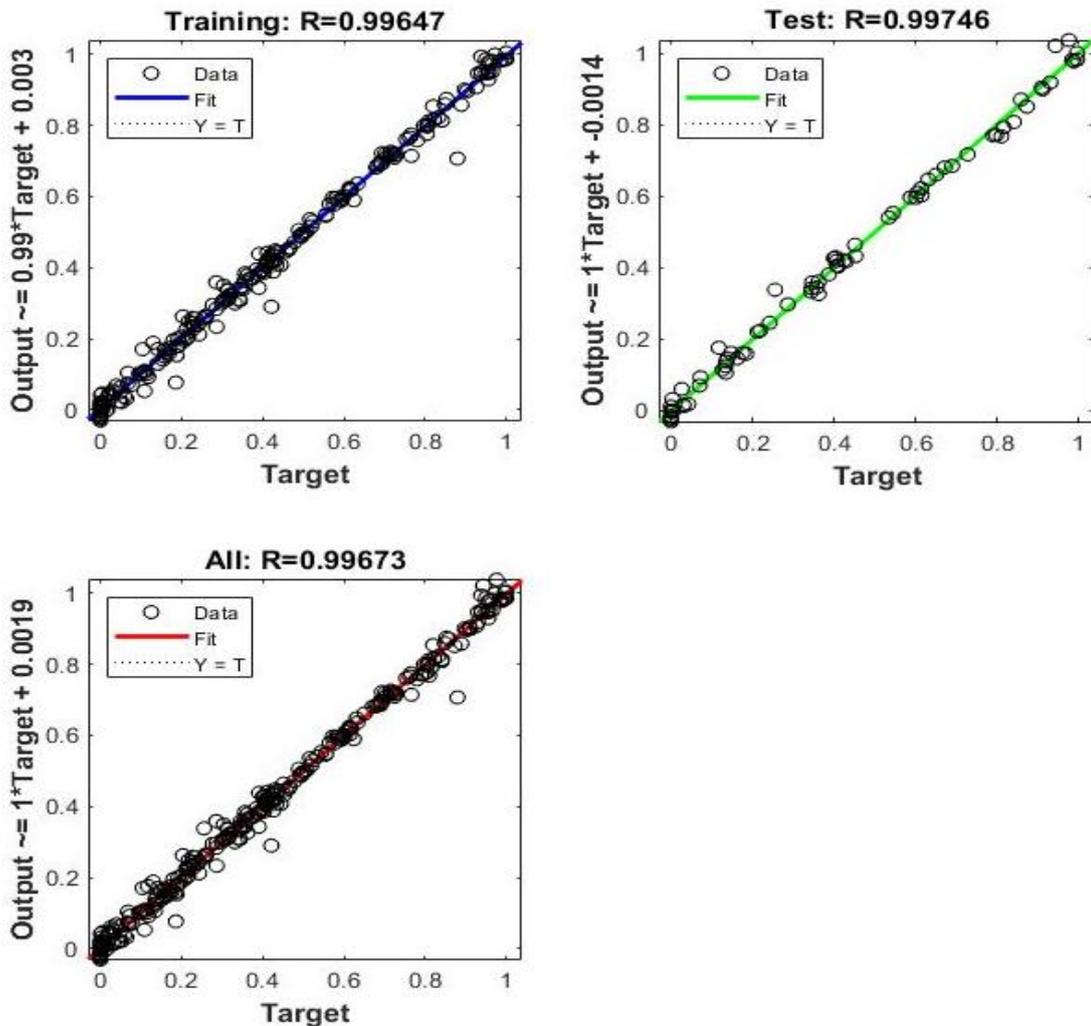


Gráfico 2-4. Regresión de la etapa de entrenamiento y evaluación de la RNA

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

En el gráfico 2-4 se puede observar el coeficiente de correlación lineal tanto para el entrenamiento y la evaluación de la RNA. Se sabe que mientras más cercano esté el valor a 1, mejor será la correlación entre las salidas simuladas y las predichas, caso contrario si el valor se aproxima a 0 se dice que existe una relación al azar.

El valor de R para el entrenamiento es de 0,99647 y para la evaluación es de 0,99746, MATLAB también calcula el R para las dos fases juntas, dando un valor de 0,99673. Estos valores indican que si existe una estrecha correlación entre las salidas simuladas y las predichas.

4.7.2. Gráficas de comparación entre las salidas simuladas y las predichas

En esta parte se procederá a comparar los resultados de las salidas predichas de la RNA con los valores originales (simulados). Primero se analizarán el conjunto de 100 valores generados en el capítulo anterior, datos que fueron utilizados para determinar la estructura y entrenamiento de la red. Para la segunda parte se hará un análisis con 20 conjuntos de datos adicionales, mismos que no formaron parte para la creación de la RNA, pero servirán para validar la funcionalidad de la misma.

4.7.2.1. Análisis gráfico de los datos empleados para la creación de la RNA

Para este punto hay que recalcar que las dos primeras salidas se encuentran normalizadas, y para presentar los valores se debe volver al valor sin normalizar, esto se hace empleando la ecuación 2-3 pero despejando el valor real.

La tabla 6-4 muestra los valores reales (simulados) y los predichos por la RNA respecto a la primera salida que son los miligramos de agua presentes por metro cúbico estándar de gas seco, con su respectivo error porcentual.

Tabla 6-4. Valores simulados vs predichos del residuo de agua en el gas seco

mgH₂O/Sm³_{gas seco}		
DWSIM	RNA	%Error
1348,272076	1352,826565	0,3378019
1448,815842	1429,18958	1,354641548
1434,252116	1420,400218	0,965792408
1436,230538	1430,602068	0,391891821
748,0341801	773,5148689	3,406353551
1425,223664	1478,981643	3,7718977
61,09579278	67,28088396	10,1235959
185,0620992	184,609137	0,244762235
1390,404675	1362,998401	1,971100528
1092,953726	1081,543248	1,044003805
1234,201747	1284,720328	4,09321905
626,8145223	626,337583	0,076089388
349,4967668	395,0756554	13,04129051
1477,742271	1471,952875	0,391773053
29,66788295	-5,023413302	116,9321596
216,3155712	197,8157555	8,552234878

333,9135328	316,0633461	5,345751195
1489,950397	1475,803651	0,949477665
1175,88182	1142,98532	2,797602588
756,683716	744,0886416	1,664509773
798,852345	807,7901895	1,118835608
1031,936084	1040,225446	0,803282481
1396,515091	1419,806278	1,667807742
129,6292748	183,4891194	41,54913673
1253,395587	1238,185525	1,213508462
256,7303062	237,3367275	7,55406673
233,358433	245,1132336	5,037229855
1211,09905	1169,714519	3,417105376
693,0302669	712,0255735	2,740905771
311,0065499	292,7946856	5,855781619
494,0838394	490,3925759	0,747092546
788,7433852	817,7560226	3,678336697
613,0336637	602,5815568	1,704980907
1444,793373	1472,321856	1,905357756
1082,124376	1087,780439	0,522681438
1356,503447	1346,745584	0,719339324
197,5716044	178,3229873	9,742603003
651,4917941	671,7087464	3,103178355
276,3264767	261,2373068	5,460631234
1236,466271	1229,846249	0,535398565
1457,856495	1497,876118	2,745100285
1493,129948	1473,296726	1,328298477
1408,044444	1489,104954	5,756956758
35,06270293	25,25355738	27,97601077
947,0354937	895,8873018	5,400873808
1211,273123	1202,830267	0,697023331
226,0400022	213,8015699	5,414277181
957,1588279	981,0125504	2,492138379
491,998103	523,9569539	6,495726441
92,1240427	56,77909187	38,36669538
753,8542002	750,4926605	0,445913779

1048,264012	1090,174045	3,998041755
173,8152971	175,3199267	0,86564857
763,1579962	760,902955	0,295488124
56,67014913	87,75995594	54,86099346
1475,743437	1472,571735	0,2149223
1212,767823	1200,140458	1,041202142
348,0798398	331,6084413	4,732074837
341,8815722	354,3002619	3,63245366
306,9074207	294,410224	4,071976054
136,4609456	166,8028053	22,23483031
188,9846294	191,0544614	1,095238279
1155,284647	1079,224621	6,583661144
75,62941527	48,99944277	35,21113102
1312,362858	1280,2783	2,444793229
1464,153848	1554,563827	6,174896109
1481,957151	1466,274536	1,058236751
340,6464881	361,4276833	6,100516502
448,9878045	557,132554	24,08634452
1493,631695	1501,840462	0,549584413
142,5524388	132,7816808	6,854149974
1365,708299	1358,886253	0,499524352
1410,152154	1428,014905	1,266725101
1190,564013	1162,534972	2,354265821
1265,323102	1217,528172	3,777290564
634,6512861	678,5641926	6,919218069
1276,833585	1292,290909	1,210598158
1322,238652	1068,15352	19,21628382
870,7974019	906,6330243	4,115265189
622,0754652	597,0025377	4,030528274
1060,538116	1086,556883	2,453355235
1396,898647	1379,986361	1,21070245
413,1107165	417,6622918	1,10178097
194,2746034	189,9865529	2,207211036
660,8467028	642,5394927	2,770265798
1435,540621	1466,284389	2,141616035

985,7481864	1001,295922	1,577252279
1415,301705	1530,002804	8,104356696
932,2162254	947,5853911	1,648669619
1220,526683	1157,917407	5,129693318
882,7327821	906,0464792	2,641082046
280,056484	286,7626886	2,394590017
1434,134648	1395,016395	2,727655508
1282,777703	1314,909831	2,504886686
268,2537864	245,0554878	8,647892301
1336,337278	1290,084918	3,461129214
469,0764713	469,8541285	0,165784745
1369,164042	1350,951112	1,33022264
1237,317146	1227,316802	0,808227992
1498,905936	1477,967784	1,396895651
ERROR PROMEDIO		6,575713767

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

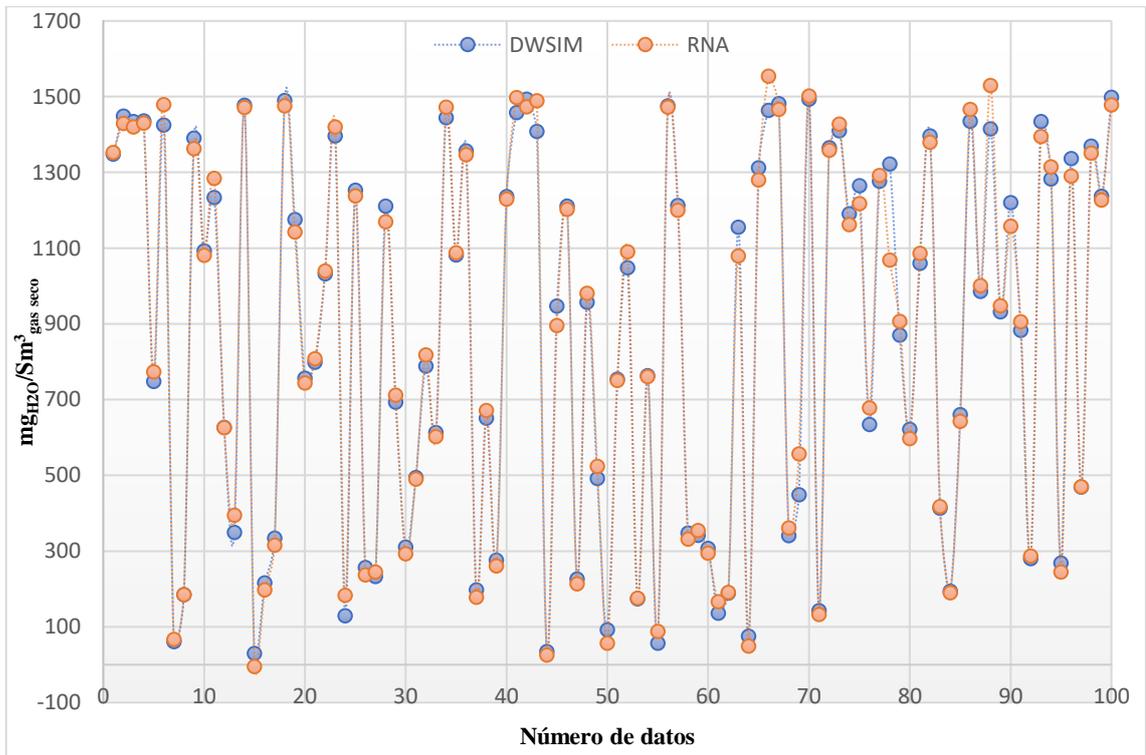


Gráfico 3-4. Residuo de agua en el gas seco simulado vs predicha

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Las tablas con los valores simulados y los predichos para la temperatura de gas seco y flujo de TEG perdido, con sus correspondientes errores porcentuales se mostrarán en los anexos E y F respectivamente.

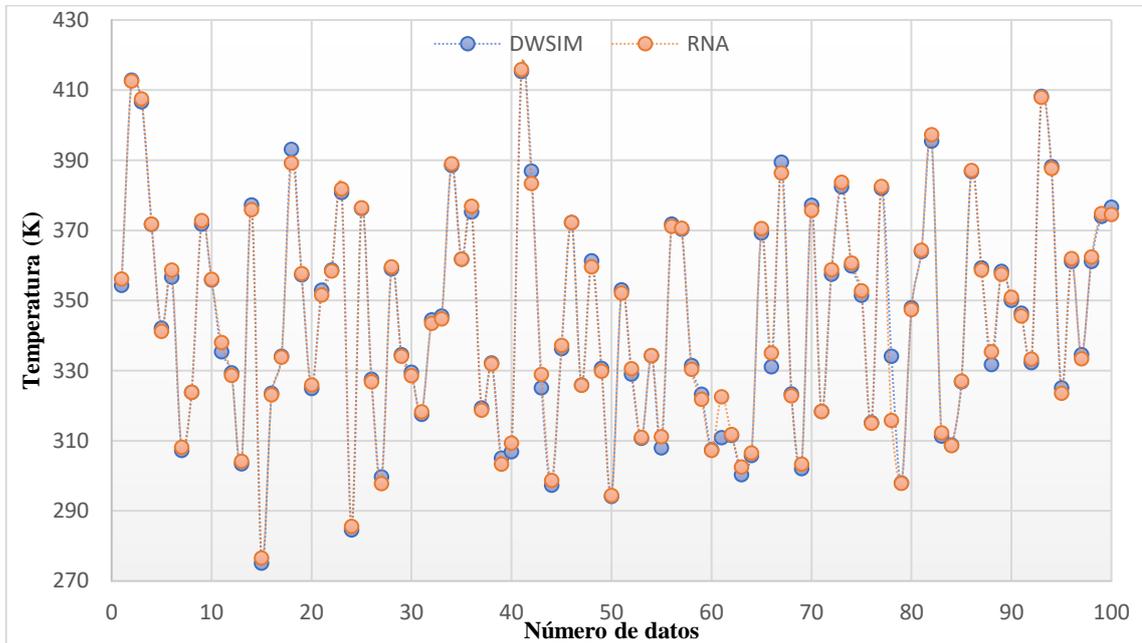


Gráfico 4-4. Temperatura de gas seco simulada vs predicha

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

El error porcentual promedio para la temperatura de gas seco es de 0,3943%

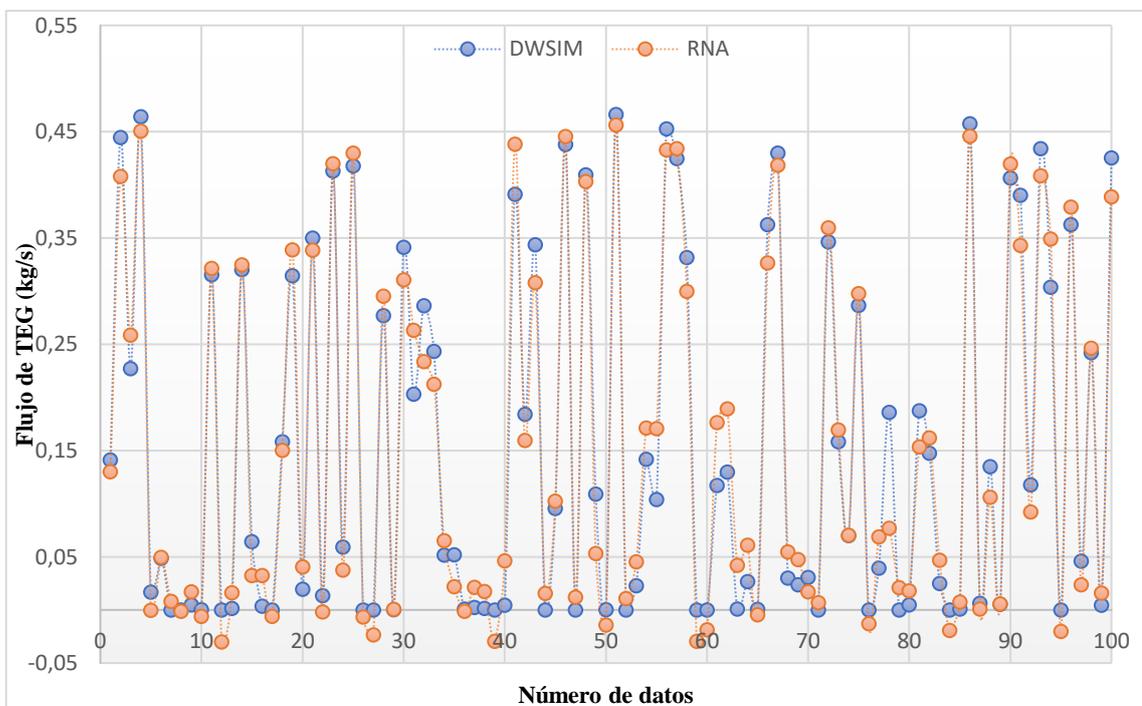


Gráfico 5-4. Flujo de TEG perdido simulado vs predicho

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Como se aprecia en el gráfico 5-4 hay una mayor dispersión de los valores respecto a los gráficos anteriores, esto se debe a la presencia de datos atípicos que incluyen valores negativos que se obtuvieron por parte de la rna. Dichos valores se pueden entender ya que en algunos datos el valor del flujo de teg simulado es excesivamente pequeño y al momento que la red genera sus valores con pequeñas variaciones respecto al valor original, se producirá un error porcentual muy grande. El error porcentual promedio que se obtuvo sin tomar en cuenta los datos atípicos es del 89,4608%

4.7.2.2. Análisis gráficos de los datos adicionales para validar la RNA

Para saber si la funcionalidad de la red es válida, se debe hacer un análisis con datos externos a los que se utilizaron para su entrenamiento y diseño. Para ello se realizaron 20 simulaciones adicionales para generar un conjunto de datos nuevos con las mismas variables anteriores.

Tabla 7-4. Base de datos adicionales para validar la RNA

Q _{reb} (kW)	T _{gas húmedo} (K)	P _{abs} (Pa)	mg _{agua} /Sm ³ _{gas}	T _{gas seco} (K)	F _{glícol} (kg/s)
0,417475728	0,60483871	0,99460923	0,729589681	0,626268363	0,19253286
0,101941748	1	0,80630463	0,992559296	1	0,23229655
0,747572816	0,725806452	0,50233967	0,922147182	0,690674038	0,37399102
0,383495146	0,741935484	0,09624802	1	0,657402226	0,22266255
0,422330097	0,443548387	0,90016103	0,456246502	0,457595978	0,086697707
0,77184466	0,637096774	0,93019235	0,780448674	0,650612572	0,3840529
0,033980583	0,120967742	0,19090499	0,072714448	0,007741709	2,68179E-06
0,514563107	0,241935484	0,50528111	0,149071193	0,197376003	0,000123734
0,048543689	0,725806452	0,50823287	0,921254394	0,691367201	0,038046682
1	0,564516129	0,88060396	0,685810745	0,573429318	0,45002426
0,990291262	0,467741935	0,29795495	0,711549206	0,395971305	0,29926908
0,67961165	0,370967742	0,68848041	0,344022375	0,356912002	0,15548363
0,563106796	0,209677419	1	0,086030041	0,242740582	0,00123869
0,514563107	0,798387097	0,40923012	0,967019127	0,754862578	0,30854463
0,029126214	0	0,81744763	0	0	7,93758E-07
0,825242718	0,258064516	0,53233041	0,315145992	0,30089109	0,082400837
0,436893204	0,322580645	0,74050195	0,242818216	0,316316049	0,026773028
0,558252427	0,919354839	0,48799814	0,991533254	0,887974879	0,40383756
0	0,588709677	0,24014928	0,893711295	0,514134674	6,32685E-05
0,665048544	0,362903226	0	0,932619378	0,229528733	0,15474207

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Tabla 8-4. Valores simulados vs predichos del residuo de agua en el gas seco para la validación

$\text{mgH}_2\text{O}/\text{Sm}^3_{\text{gas seco}}$		
DWSIM	RNA	%Error
1076,43309	1044,37472	2,97820403
1458,64241	1478,07419	1,33218262
1356,30296	1351,48452	0,35526294
1469,45699	1453,23576	1,10389314
679,146461	626,300799	7,7811879
1150,35334	1143,55364	0,59109664
121,707432	149,755847	23,0457707
232,68702	227,104779	2,39903447
1355,00535	1340,73247	1,05334521
1012,80324	1046,52587	3,32963343
1050,21243	1039,24222	1,04456977
516,035953	537,222154	4,105567
141,060784	153,364817	8,72250452
1421,52143	1417,47768	0,28446595
16,0216851	-72,0275926	549,563151
474,065997	256,279323	45,9401593
368,942254	358,586618	2,80684461
1457,15113	1442,02412	1,03812224
1314,97324	1320,61748	0,42922887
1371,52362	1419,43351	3,49318775
ERROR PROMEDIO		5,88601374

Los valores resaltados no se toman en cuenta para el cálculo del error promedio ya que son datos atípicos

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

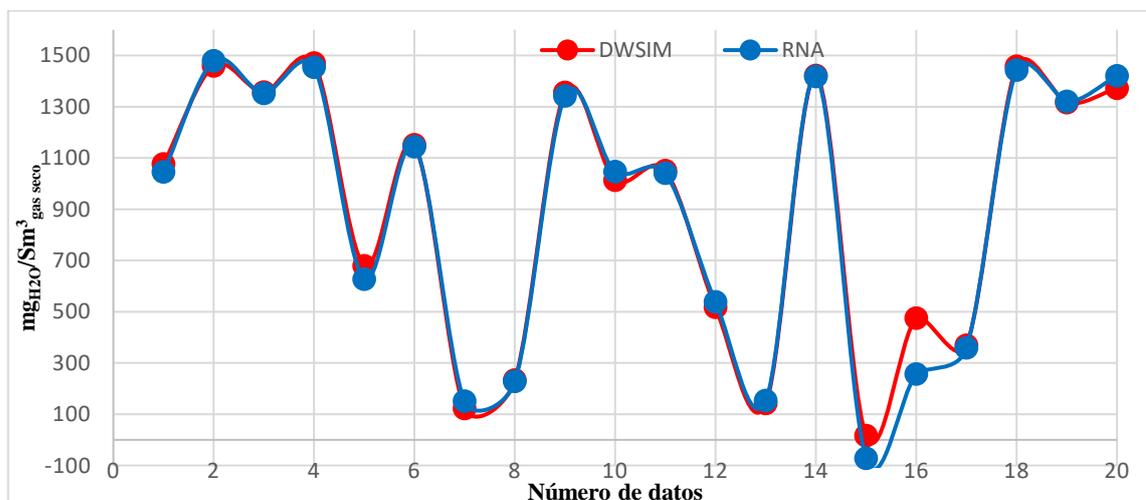


Gráfico 6-4. Residuo de agua del gas seco en la validación

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Tabla 9-4. Valores simulados vs predichos de la temperatura de gas seco para la validación

T gas seco (K)		
REAL	RNA	%Error
366,122	372,105683	1,63434135
410,873	410,416926	0,11100118
373,834	378,25597	1,18287004
369,85	373,653286	1,0283319
345,925	353,684853	2,2432183
369,037	374,059616	1,36100616
292,059	305,608319	4,63924035
314,766	325,729142	3,48294991
373,917	378,655851	1,26735364
359,795	365,534486	1,59521012
338,546	348,085622	2,8178215
333,869	342,532216	2,59479497
320,198	331,79333	3,6212998
381,52	385,00483	0,91340688
291,132	308,45575	5,95047954
327,161	327,631323	0,14375879
329,008	338,525086	2,8926609
397,459	399,100324	0,41295424
352,695	361,133128	2,39247181
318,616	331,347935	3,99601236
ERROR PROMEDIO		2,21405919

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

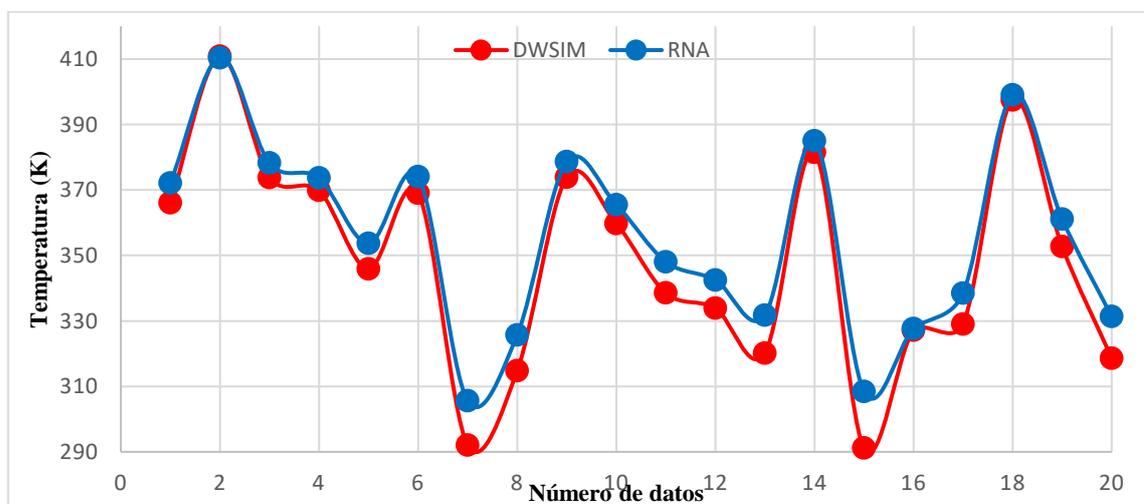


Gráfico 7-4. Temperatura de gas seco en la validación

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Tabla 10-4. Valores simulados vs predichos del flujo de TEG perdido para la validación

TEG (kg/s)		
DWSIM	RNA	%Error
0,19253286	0,1687231	12,3665934
0,23229655	0,19872425	14,4523438
0,37399102	0,43120398	15,2979512
0,22266255	0,2440893	9,62297066
0,08669771	0,08205938	5,35000325
0,3840529	0,41761537	8,73902178
2,6818E-06	-0,0074018	276102,286
0,00012373	0,01235042	9881,44904
0,03804668	0,01679145	55,8661795
0,45002426	0,4851274	7,80027738
0,29926908	0,40224557	34,4093304
0,15548363	0,15489469	0,37877791
0,00123869	0,02459932	1885,91311
0,30854463	0,35054128	13,611208
7,9376E-07	-0,04950759	6237209,82
0,08240084	0,13764964	67,0488388
0,02677303	0,03275116	22,3289425
0,40383756	0,38478106	4,71885351
6,3268E-05	-0,02075578	32905,8767
0,15474207	0,16218169	4,80775569
ERROR PROMEDIO		18,4532699

Los valores resaltados no se toman en cuenta para el cálculo del error promedio ya que son datos atípicos

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

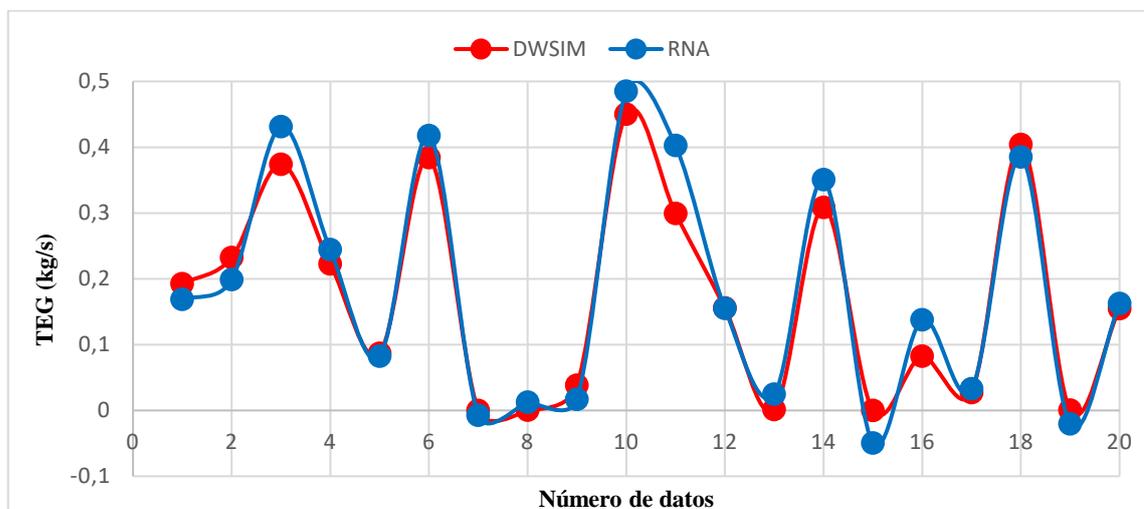


Gráfico 8-4. Flujo de TEG perdido en la simulación

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

Los gráficos de dispersión mostrados en esta sección muestran la concordancia entre los valores reales o simulados (curva roja) y los valores predichos por la RNA (curva azul) para cada salida analizada.

Al momento de sobreponer las curvas se observa una compatibilidad moderada, inclusive se pueden observar datos atípicos. Es por eso que, aunque los errores porcentuales y la compatibilidad de las gráficas sean aceptables, se desarrollará un análisis estadístico para el conjunto de datos utilizados en la validación, dicho análisis permitirá saber con precisión si la RNA diseñada es aceptada o no.

4.8. Resultados del análisis estadístico

4.8.1. Gráficos de cajas y bigotes

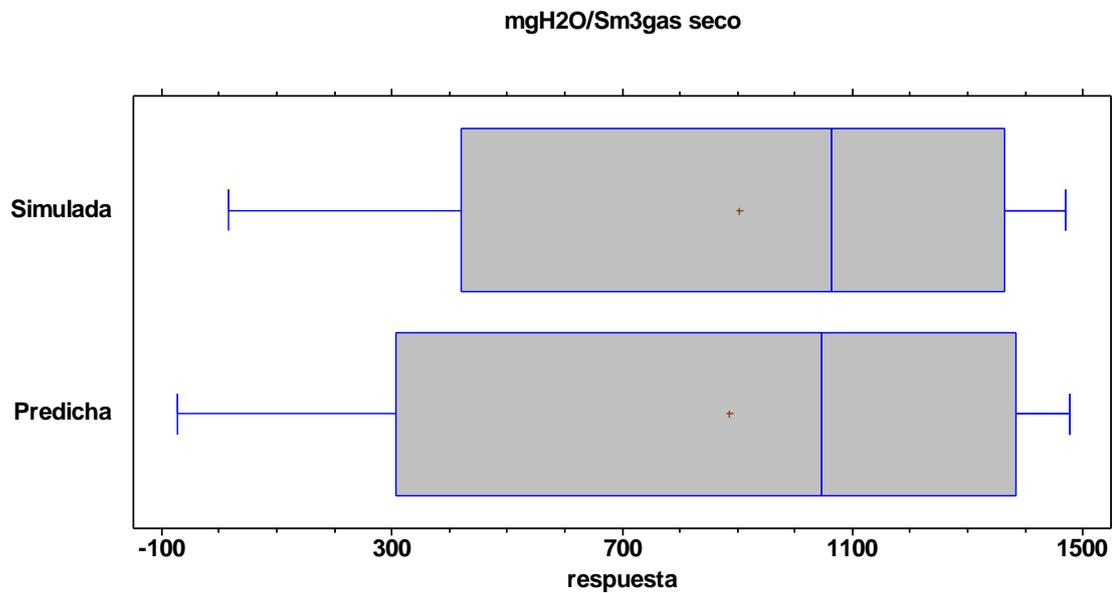


Gráfico 9-4. Caja y bigotes para el residuo de agua en el gas seco

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

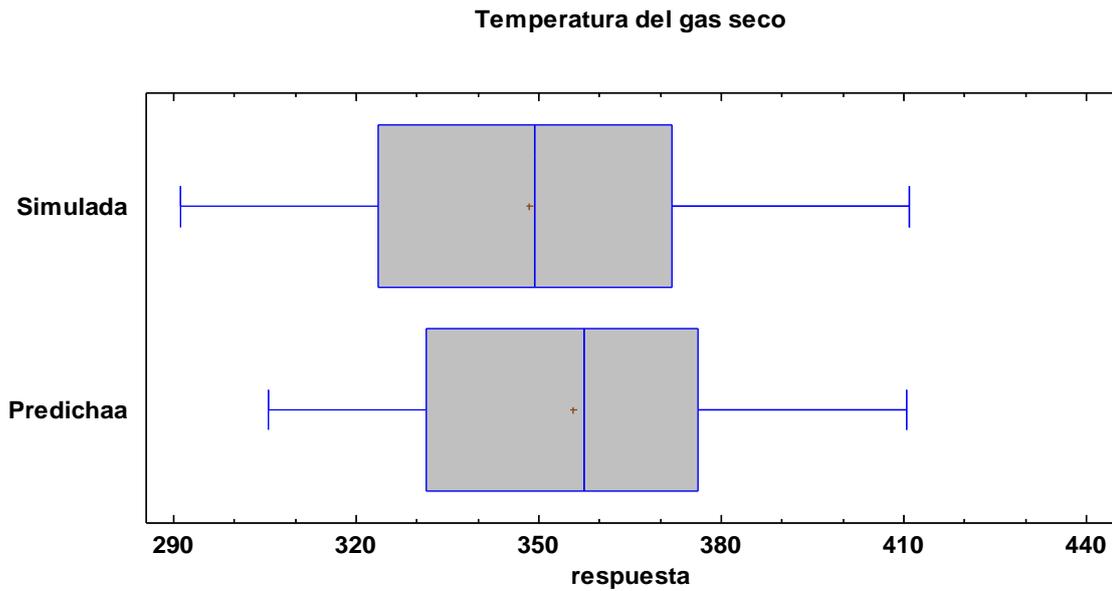


Gráfico 10-4. Caja y bigotes para la temperatura del gas seco

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

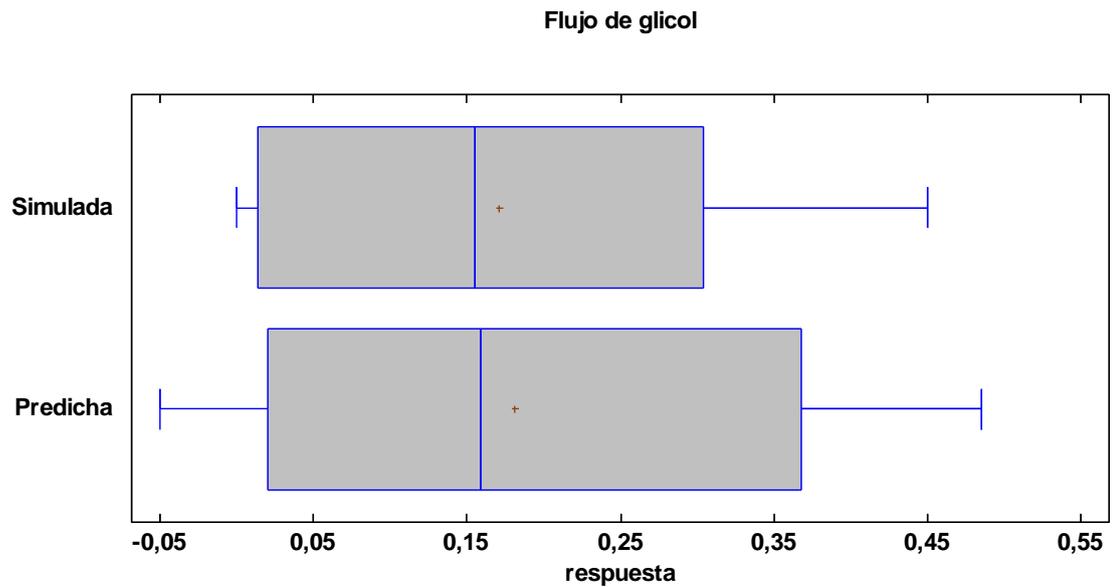


Gráfico 11-4. Caja y bigotes para el flujo de glicol perdido

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

En los gráficos de caja y bigotes no se aprecia una semejanza fuerte entre los valores simulados y los predichos por la RNA puesto que para cada salida se observa limites superiores e inferiores diferentes, lo mismo pasa para otros aspectos como el rango, rango intercuartil y las medianas. Por lo tanto, se procederá a hacer un análisis más riguroso como lo es el análisis de ANOVA.

4.8.2. Análisis ANOVA

Tabla 11-4. Análisis ANOVA

Fuente	Suma de cuadrados	G1	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Residuo de agua en el gas seco (mgH₂O/Sm³_{gas seco})					
Entre grupos	2413,11	1	2413,11	0,01	0,9271
Intra grupos	1,08E+07	38	284782		
Total (Corr.)	1,08E+07	39			
Temperatura de gas seco (K)					
Entre grupos	525,13	1	525,13	0,55	0,4637
Intra grupos	36410,7	38	958,176		
Total (Corr.)	36935,8	39			
Flujo de TEG perdido (kg/s)					
Entre grupos	0,0011651	1	0,0011651	0,04	0,8376
Intra grupos	1,03921	38	0,0273476		
Total (Corr.)	1,04038	39			

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021.

El análisis ANOVA hecho nos permite saber si existe alguna diferencia significativa entre las medias de los datos simulados en DWSIM y los datos predichos por la RNA para cada salida. Para ello se establecen dos hipótesis:

- Hipótesis nula: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \dots \mu_n$
- Hipótesis alternativa: Las medias no son iguales

Dónde μ hace referencia a las medias poblaciones de la n-ésima muestra, en este caso a la media entre los datos simulados y los datos predichos. Por lo tanto, si se llega a descartar la hipótesis nula, entonces se aceptaría la hipótesis alternativa y se determinaría que las medias no son estadísticamente iguales, caso contrario si lo serían.

Para saber si se descarta o no la hipótesis nula se determina el P-valor para cada salida, si dicho valor llegase a ser menor que 0,05 entonces se descartaría la hipótesis nula, si es mayor se aceptaría.

Por consiguiente, como se puede observar en la tabla 11-4 todos los P-valor de las salidas son mayores a 0.05, entonces se aceptan las hipótesis nulas y se concluye que no existe una diferencia significativa entre las medias de ninguna variable con un nivel de confianza del 95%

CONCLUSIONES

- Mediante el software DWSIM se realizó la simulación del proceso de deshidratación de gas natural por absorción utilizando Trietilenglicol. El proceso fue propuesto por (Chebbi et al., 2019) y sirvió de base para la obtención de los parámetros, equipos y condiciones de funcionamiento.
- Se validó la simulación comparando los resultados obtenidos con los mostrados por (Chebbi et al., 2019) mediante el cálculo del error porcentual de las líneas de flujo más importantes. Como se mostró en la tabla 4-4 los errores no sobrepasan el 10% excepto en el valor de la pérdida de glicol que, aunque es grande se acepta debido a que el valor original es pequeño y en esos casos se tiende a tener errores grandes.
- Empelando un análisis de sensibilidad se determinaron las entradas y salidas que se utilizaron para la creación de la RNA. Las entradas son: Temperatura de gas húmedo, presión del absorbedor y calor del reboiler. Las salidas son: fracción de agua de gas seco expresado en $\text{mg}_{\text{agua}}/\text{Sm}^3_{\text{gas}}$, temperatura de gas seco y flujo de TEG perdido.
- Con la utilización del software MATLAB y su herramienta Neural Net Fitting se creó la red neuronal artificial (RNA) con la capacidad de predecir las todas las variables de salida que se determinaron en el análisis de sensibilidad. La RNA creada presenta la siguiente estructura 3-7-3 (3 neuronas de entrada, 7 neuronas ocultas y 3 neuronas de salida). Fue creada con el algoritmo de entrenamiento de la regularización Bayesian dando un MSE de $5.3824\text{e-}04$ y un coeficiente de regresión lineal de 0,99673.
- Se validó la RNA realizando un análisis estadístico de ANOVA, donde se compararon los valores reales (simulados) con los valores predichos (RNA) y se determinó que con un valor de confiabilidad del 95% no existe una diferencia significativa entre los valores analizados.

RECOMENDACIONES

- Al momento de querer realizar una simulación de algún proceso propuesto por un determinado autor, hay que fijarse que el mismo tenga los resultados expuestos de cada línea de flujo para poder comparar con los valores que nosotros obtengamos y determinar si se pueden o no obtener dichos resultados.
- Para determinar los pares de datos que se emplearan para crear la RNA sería interesante realizar un correcto procesamiento de los mismos, así se podría descartar la presencia de datos atípicos que afecten la capacidad de predicción de la red.
- Para la presente red neuronal artificial creada se podría ampliar la capacidad de predicción de la misma, añadiendo nuevas variables de entrada como la pureza del glicol y a su vez nuevas variables de salida como flujos de materia o fracciones másicas de otro compuesto en equipos diferentes equipos.
- La codificación de la RNA diseñada puede ser empleada en algún otro proceso químico que no sea solo destilación. Ya que como se mostró en el presente trabajo además de predecir resultados en una torre de destilación la RNA pudo predecir valores en el absorbedor.

GLOSARIO

Absorción: separación selectiva de un componente que se encuentra dentro de una mezcla gaseosa, mediante la difusión molecular del mismo en otro compuesto que se encuentra en estado líquido.

Análisis de sensibilidad: es un método que se utiliza con la finalidad de determinar cómo afecta una variable independiente a una variable dependiente en un determinado rango de valores.

Análisis estadístico: es una herramienta que nos ayuda a determinar patrones y tendencias de un conjunto de datos, y a su vez interpretar dichos datos con la finalidad de tomar una decisión.

Deshidratación de gas natural: método que sirve para disminuir el agua que puede estar presente en fase líquida o vapor y en cantidades diferentes que dependerán de las condiciones del pozo de donde se extraiga el gas.

Gas natural: es un flujo gaseoso de hidrocarburos livianos en los que destacan el metano y el etano, además de otras impurezas como el agua, azufre, dióxido de carbono, entre otros. Se puede encontrar forma libre o asociado al petróleo

Red neuronal artificial (RNA): son técnicas que se basan en el funcionamiento del cerebro humano con la capacidad de realizar tareas complejas que no podrían ejecutarse con la programación clásica. La principal característica de las RNA, es que al igual que el cerebro humano, estas también tienen la capacidad de aprender mediante una serie de algoritmos.

Regularización Bayesian: algoritmo de entrenamiento que se caracteriza por ser más robusto que otros tipos de entrenamientos, por lo que omiten la etapa de validación en el diseño de una RNA.

Trietilenglicol: compuesto químico con elevada afinidad con el agua utilizado para procesos de deshidratación de gas natural por absorción

.

BIBLIOGRAFÍA

AFSHIN, T., ALI, B.H., HOSSEIN, M., SAEID, N., MEYSAM, B., MOONYONG, L., ALIREZA, B. y ADEL, N.M. "Prediction of water formation temperature in natural gas dehydrators using radial basis function (RBF) neural networks". *Natural Gas Industry B* [en línea], 2016, vol. 3, no. 2, pp. 173-180. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 23528559. Disponible en: 10.1016/j.ngib.2016.06.002.

AHMADI, M.A., SOLEIMANI, R. y BAHADORI, A. "A computational intelligence scheme for prediction equilibrium water dew point of natural gas in TEG dehydration systems". *Fuel* [en línea], 2014, vol. 137, pp. 145-154. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 00162361. Disponible en: 10.1016/j.fuel.2014.07.072.

ARANEA, J.F., DOMINGUEZ, J.C. y PERUGACHI, S.J. Metodos de deshidratacion de gas natural [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. 2012. pp. 59 [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/24525/FICT_M%c3%a9to%20de%20Deshidratacion%20de%20Gas%20Natural.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ARYA, A., MARIBO-MOGENSEN, B., TSIVINTZELIS, I. y KONTOGEORGIS, G.M. "Process design of industrial triethylene glycol processes using the Cubic-Plus-Association (CPA) equation of state". *Industrial and Engineering Chemistry Research* [en línea], 2014, vol. 53, no. 29, pp. 11766-11778. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 15205045. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie501251d>.

BAHADORI, A. y VUTHALURU, H.B. "Rapid estimation of equilibrium water dew point of natural gas in TEG dehydration systems". *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [en línea], 2009a, vol. 1, no. 3, pp. 68-71. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 18755100. Disponible en: 10.1016/j.jngse.2009.08.001.

BAHADORI, A. y VUTHALURU, H.B. "Simple methodology for sizing of absorbers for TEG (triethylene glycol) gas dehydration systems". *Energy* [en línea], 2009b, vol. 34, no. 11, pp. 1910-1916. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 03605442. Disponible en: 10.1016/j.energy.2009.07.047.

C., E.C., N., U.C., E., O.E. y J., I.O. "Natural gas dehydration with triethylene glycol (teg)". *European Scientific Journal* [en línea], 2015, vol. 11, no. 30, pp. 1857-7881. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 1857-7431. Disponible en: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/6352>.

CHEBBI, R., QASIM, M. y ABDEL JABBAR, N. "Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas". *Energy Reports* [en línea], 2019, vol. 5, pp. 723-732. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 23524847. Disponible en: 10.1016/j.egy.2019.06.014.

DARWISH, N.A. y HILAL, N. "Sensitivity analysis and faults diagnosis using artificial neural networks in natural gas TEG-dehydration plants". *Chemical Engineering Journal* [en línea], 2008, vol. 137, no. 2, pp. 189-197. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 13858947. Disponible en: 10.1016/j.cej.2007.04.008.

DÁVILA, W. Simulación y validación de un sistema de destilación para la separación de azeótropos de co₂-etano en procesos mejorados de recuperación de petróleo (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2020. pp. 142.

EL MAWGOUD, H.A., ELSHIEKH, T.M. y KHALIL, S.A. "Process simulation for revamping of a dehydration gas plant". *Egyptian Journal of Petroleum* [en línea], 2015 vol. 24, no. 4, pp. 475-482. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 20902468. Disponible en: 10.1016/j.ejpe.2015.01.001.

ENERDATA. *Anuario estadístico mundial de energía 2020*. [blog]. 2020. [Consulta: 10 enero 2021]. Disponible en: <https://datos.enerdata.net/gas-natural/consumo-mundial.html>.

FALZONE LEÓN, E.Y. Determinación Del Contenido De Agua En El Gas Natural Y Su Incidencia En La Eficiencia De Los Procesos De Deshidratación [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado). Universidad de Oriente Núcleo de Monagas, Monagas, Venezuela. 2014. pp. 125. [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria de Petroleo y Gas/ISABEL LEON.pdf.

GHIASI, M.M., BAHADORI, A. y ZENDEHBOUDI, S. "Estimation of triethylene glycol (TEG) purity in natural gas dehydration units using fuzzy neural network". *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [en línea], 2014, vol. 17, pp. 26-32. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 18755100. Disponible en: 10.1016/j.jngse.2013.12.008.

GHIASI, M.M., BAHADORI, A., ZENDEHBOUDI, S. y CHATZIS, I. "Rigorous models to optimise stripping gas rate in natural gas dehydration units". *Fuel* [en línea], 2014, vol. 140, pp. 421-428. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 00162361. Disponible en: 10.1016/j.fuel.2014.09.084.

GÓMEZ VALDIVIESO, C.E. Evaluación de la factibilidad del uso del gas natural producido en el campo shushufindi como una alternativa energética para disminuir la contaminación ambiental en el oriente ecuatoriano [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador. 2016. pp. 203. [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/16757/65033_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

LAPUERTA, A. El Gas Natural: Una posibilidad de combustible limpio en el Mercado Automotriz del Ecuador [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador. 2008. pp. 94. [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/986/1/T678-MRI-Lapuerta-El%20gas%20natural.pdf>.

LIN, H., THOMPSON, S.M., SERBANESCU-MARTIN, A., WIJMANS, J.G., AMO, K.D., LOKHANDWALA, K.A., LOW, B.T. y MERKEL, T.C. "Dehydration of natural gas using membranes. Part II: Sweep/countercurrent design and field test". *Journal of Membrane Science* [en línea], 2012, vol. 432, pp. 106-114. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 03767388. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037673881300015X>.

LLORET, P. Estado De La Tecnología En La Cadena De Valor Del Gas Natural: Aplicaciones a Nuevos Productos Y Servicios [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2015. pp. 237. [Consulta: 2021-01-10]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/53239>.

MOHAMMADI, A.H. y RICHON, D. "Use of artificial neural networks for estimating water content of natural gases". *Industrial and Engineering Chemistry Research* [en línea], 2007, vol. 46, no. 4, pp. 1431-1438. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 08885885. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie060494u>.

MOSTACCIO, D.J. Simulación de altas prestaciones para modelos orientados al individuo [En línea]. (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España. 2007. pp. 146. [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/48656/djm1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MOYA GALARZA, F.J. Separación de partículas de crudo presentes en el gas asociado utilizado como combustible [En línea]. (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2013. pp. 4. [Consulta: 2021-01-06]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2008/1/T-UCE-0017-47.pdf>.

NEAGU, M. y CURSARU, D.L. "Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants". *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [en línea], 2017, vol. 37, pp. 327-340. ISSN 18755100. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.052>.

NETUSIL, M. y DITL, P. "Comparison of three methods for natural gas dehydration". *Journal of Natural Gas Chemistry* [en línea], 2011, vol. 20, no. 5, pp. 471-476. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 10039953. Disponible en: [10.1016/S1003-9953\(10\)60218-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-9953(10)60218-6).

NMEGBU CHUKWUMA, G.J "Optimization of triethylene glycol (teg) dehydration in a natural gas processing plant". *International Journal of Research in Engineering and Technology* [en línea], 2014, vol. 03, no. 06, pp. 346-350. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 23217308. Disponible en: [10.15623/ijret.2014.0306064](http://dx.doi.org/10.15623/ijret.2014.0306064).

NUÑEZ RODRIGUEZ, J.C. y CUMPA BARDALES, C.F. Simulación del proceso de deshidratación del gas natural con trietilen glicol (teg), utilizando software aspen hysys en la fiq-unap [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos-Perú. 2015. pp. 115. Disponible en: http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/4267/Juan_Tesis_Titulo_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

PETROPOULOU, E.G. y VOUSAS, E.C. "Thermodynamic Modeling and Simulation of Natural Gas Dehydration Using Triethylene Glycol with the UMR-PRU Model". *Industrial and Engineering Chemistry Research* [en línea], 2018, vol. 57, no. 25, pp. 8584-8604. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 15205045. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.8b01627>.

RANJBAR, Hemat, AHMADI, H., KHALIGHI SHESHDEH, R. y RANJBAR, Hedyeh. "Application of relative sensitivity function in parametric optimization of a tri-ethylene glycol dehydration plant". *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [en línea], 2015 vol. 25, pp. 39-45. [Consulta: 13 enero 2021]. ISSN 18755100. Disponible en: [10.1016/j.jngse.2015.04.028](http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.04.028).

RIBÓN, M.H., SANTOS SANTOS, N. y ORTIZ CANCINO, O.P. "Métodos de deshidratación de gas natural". *El Reventón Energético* [en línea], 2010, vol. 8, no. 2, pp. 55-64. Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/1633>.

TAGLIABUE, M., FARRUSSENG, D., VALENCIA, S., AGUADO, S., RAVON, U.,

RIZZO, C., CORMA, A. y MIRODATOS, C. "Natural gas treating by selective adsorption: Material science and chemical engineering interplay" *Chemical Engineering Journal* [en línea], 2009, vol. 155, no. 3, pp. 553-566. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 13858947. Disponible en: 10.1016/j.cej.2009.09.010.

YU, G., DAI, C., WU, L. y LEI, Z. "Natural Gas Dehydration with Ionic Liquids". *Energy and Fuels* [en línea], 2017, vol. 31, no. 2, pp. 1429-1439. [Consulta: 11 enero 2021]. ISSN 15205029. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.energyfuels.6b02920>.

ANEXOS

ANEXO A: DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS PARA LA CREACIÓN DE LA RNA

Creación de la RNA	
Variable	Descripción
Norm2	Enlazar el documento de Excel a MATLAB
datos	Busca la hoja específica de Excel que contiene el conjunto de datos
matriz	Extrae todos los valores de Excel
Entradas	Extrae la temperatura de gas húmedo, presión del absorbedor y calor del reboiler
Salidas	Extrae la fracción de agua en el gas seco, temperatura de gas seco y flujo de TEG perdido
Pred	Valores predichos por la RNA

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021

**ANEXO B: DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN
DE LA RNA**

Validación	
Variable	Descripción
Norm2	Enlazar el documento de Excel a MATLAB
validación	Busca la hoja específica de Excel que contiene el conjunto de datos
matrizval	Extrae todos los valores de Excel para la validación
rnafinal.mat	Parámetros cargados de la RNA diseñada
entval	Extrae la temperatura de gas húmedo, presión del absorbedor y calor del reboiler diferentes a los usados en el entrenamiento
Val	Valores predichos por la RNA

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021

ANEXO C: SCRIPT PARA LA CREACIÓN DE LA RNA

```
%obtener los datos desde la hoja de excell
obtener=readtable('Norm2.xlsx','sheet','datos');

%Convertir la tabla de datos a Matriz Numérica
matriz=table2array(obtener);

%Variables de Entrada
Entradas=matriz(1:3,:);

%Variables de Salida
Salidas=matriz(4:6,:);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Creacion de la RNA
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by Neural Fitting app
% Created 28-Jan-2021 14:02:36
%
% This script assumes these variables are defined:
%
% Entradas - input data.
% Salidas - target data.

x = Entradas;
t = Salidas;

% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help nntrain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
trainFcn = 'trainbr'; % Bayesian Regularization backpropagation.

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 7;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
```

```

% Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
% For a list of all processing functions type: help nnprocess
net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
% For a list of all data division functions type: help nndivision
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 75/100;
net.divideParam.valRatio = 0/100;
net.divideParam.testRatio = 25/100;

% Choose a Performance Function
% For a list of all performance functions type: help nnperformance
net.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error

% Choose Plot Functions
% For a list of all plot functions type: help nnplot
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression', 'plotfit'};

% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)

% Recalculate Training, Validation and Test Performance
trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y)
valPerformance = perform(net,valTargets,y)

```

```

testPerformance = perform(net,testTargets,y)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
% figure, plotperform(tr)
% figure, plottrainstate(tr)
% figure, ploterrhist(e)
% figure, plotregression(t,y)
% figure, plotfit(net,x,t)

% Deployment
% Change the (false) values to (true) to enable the following code blocks.
% See the help for each generation function for more information.
if (false)
    % Generate MATLAB function for neural network for application
    % deployment in MATLAB scripts or with MATLAB Compiler and Builder
    % tools, or simply to examine the calculations your trained neural
    % network performs.
    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction');
    y = myNeuralNetworkFunction(x);
end
if (false)
    % Generate a matrix-only MATLAB function for neural network code
    % generation with MATLAB Coder tools.
    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction','MatrixOnly','yes');
    y = myNeuralNetworkFunction(x);
end
if (false)
    % Generate a Simulink diagram for simulation or deployment with.
    % Simulink Coder tools.
    gensim(net);
end
Pred=net(Entradas(1:end,:));

```

ANEXO D: SCRIPT PARA LA VALIDACIÓN DE LA RNA

%obtener los datos desde la hoja de excell

```
obtener=readtable('Norm2.xlsx','sheet','validacion');
```

%Convertir la tabla de datos a Matriz Numérica

```
matrizval=table2array(obtener);
```

% Cargar archivo net y workspace del entrenamiento

```
load('rnafinal.mat');
```

%Ingreso de las nuevas entradas para validar

```
entval=(matrizval(1:3,:));
```

%Obtener salidas con las nuevas entradas

```
Val=net(entval(1:end,:));
```

ANEXO E: VALORES SIMULADOS VS PREDICHOS DE LA TEMPERATURA DE GAS SECO

T gas seco (K)		
REAL	RNA	%Error
354,261	356,169473	0,538719371
412,889	412,603953	0,069037218
406,691	407,516019	0,202861401
371,705	371,799304	0,025370537
342,132	341,211552	0,269032972
356,718	358,7119	0,558957017
307,246	308,142351	0,291737088
323,79	323,823843	0,010452159
371,788	372,819859	0,277539533
355,825	356,042075	0,061006206
335,384	338,008613	0,782569462
329,355	328,59844	0,229709469
303,426	304,101868	0,222745545
377,274	375,911575	0,361123386
275,081	276,508708	0,519013741
323,491	323,113469	0,116705343
334,094	333,792328	0,09029551
393,082	389,178065	0,993160479
357,342	357,66058	0,089152748
324,913	325,908989	0,306540136
352,983	351,614868	0,387591379
358,712	358,439418	0,075989051
380,784	381,807398	0,268760642
284,529	285,587746	0,372104913
376,274	376,421406	0,039175291
327,533	326,816238	0,21883662
299,705	297,746755	0,653390864
359,014	359,546559	0,148339458
334,536	334,091955	0,13273457
329,535	328,503163	0,313119203
317,524	318,271016	0,235262769
344,432	343,459834	0,282251914
345,594	344,704502	0,257382271
388,515	388,985791	0,12117712
361,742	361,774218	0,008906422
375,243	376,859566	0,430805176
319,319	318,688664	0,197400147
332,209	331,932908	0,083108065
305,046	303,314148	0,567734598
306,857	309,361692	0,81624074

415,285	415,899939	0,148076277
386,879	383,350868	0,911947129
325,077	328,947189	1,190545216
297,344	298,676199	0,448033081
336,279	337,162741	0,2627998
372,264	372,216662	0,012716301
325,9	325,767755	0,040578279
361,276	359,597094	0,46471557
330,59	329,824105	0,231675235
294,083	294,400093	0,10782424
353	352,106969	0,252983351
329,014	330,501632	0,45214848
310,667	310,9807	0,100976308
334,234	334,319136	0,025472081
307,971	311,103176	1,017036022
371,759	371,17218	0,157849707
370,368	370,61148	0,065740028
331,439	330,337501	0,332338437
323,296	321,769895	0,472045867
307,455	307,275457	0,058396429
310,899	322,553352	3,748597597
311,527	311,80736	0,0899953
300,281	302,536638	0,75117559
305,781	306,547843	0,250781907
369,216	370,55191	0,361823453
331,132	334,961845	1,156591731
389,482	386,320029	0,811840081
323,382	322,821591	0,173296294
302,006	303,294259	0,426567487
377,137	375,679455	0,386476291
318,336	318,321016	0,004707105
357,467	358,799638	0,372800172
382,452	383,676192	0,320090415
359,876	360,718478	0,23410228
351,484	352,722849	0,352462504
315,128	314,936697	0,060706542
382,013	382,502905	0,128243032
334,117	315,749835	5,497225453
297,96	297,889688	0,023597635
347,939	347,387111	0,158616458
363,916	364,30836	0,107816053
395,461	397,242937	0,450597306
311,318	312,220672	0,289951758
308,762	308,577153	0,059867206
326,783	327,034556	0,076979566

386,836	387,107075	0,070075001
359,333	358,716956	0,171440868
331,752	335,350828	1,084794789
358,336	357,507041	0,231335718
350,015	350,898268	0,252351548
346,382	345,528122	0,246513365
332,265	333,311291	0,314896497
408,21	407,956023	0,062217167
388,138	387,650081	0,125707532
325,118	323,486502	0,501817325
361,131	361,958329	0,229093926
334,52	333,396667	0,335804546
361,147	362,375642	0,340205533
373,96	374,81404	0,228377364
376,626	374,488015	0,567668018
ERROR PROMEDIO		0,394371468

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021

ANEXO F: VALORES SIMULADOS VS PREDICHOS DEL FLUJO DE TEG PERDIDO

TEG (kg/s)		
REAL	RNA	%Error
0,14122393	0,13019279	7,81109958
0,44465433	0,40779765	8,2888378
0,22722968	0,25857408	13,7941491
0,46422854	0,450695	2,9152748
0,0169188	-0,00028349	101,67557
0,04874817	0,04971001	1,97308772
1,68E-06	0,00815671	485333,368
5,69E-06	-0,0012949	22871,3211
0,00488007	0,01713996	251,223749
0,00019335	-0,00607316	3241,06959
0,31542444	0,32129559	1,86134817
7,36E-06	-0,02993557	406620,621
0,00155074	0,01618628	943,778443
0,32030218	0,32476171	1,39228812
0,0641638	0,03230717	49,6489142
0,00367911	0,0323037	778,029591
5,72E-05	-0,00587125	10367,4063
0,15838166	0,15034134	5,07654452
0,31448033	0,33879122	7,73049489
0,01942959	0,04061386	109,030967
0,35000876	0,33840082	3,3164716
0,01363627	-0,00190851	113,99587
0,4129123	0,41998004	1,71168075
0,05926031	0,03751819	36,6891778
0,41770669	0,42991151	2,92186259
9,21E-06	-0,0065743	71510,7614
4,89E-07	-0,02341836	4784953,51
0,27682377	0,29542327	6,71889522
0,00025416	0,00066653	162,245951
0,34136735	0,31058701	9,01677794
0,20313264	0,26303935	29,4914228
0,28623065	0,23364922	18,3703007
0,24336184	0,21226845	12,7766069
0,05151511	0,06504206	26,2582201
0,05195711	0,02196337	57,7278803
0,00075725	-0,0012457	264,502812
0,00246281	0,021333	766,204483
0,00150375	0,01733781	1052,97159
5,36E-07	-0,02951853	5505440,67
0,00457874	0,0463599	912,503302

0,39105052	0,438408	12,1103216
0,18424796	0,15940981	13,4808292
0,34371078	0,30791827	10,4135553
4,21E-05	0,01562903	37036,0062
0,09557705	0,10232509	7,06031123
0,43786386	0,44557884	1,7619593
7,25E-05	0,01196985	16415,8305
0,40931602	0,40313333	1,51049265
0,10906711	0,0530161	51,3912998
0,00025066	-0,0142703	5792,99755
0,46629585	0,4562472	2,15499448
6,74E-05	0,0107737	15880,0966
0,02267646	0,04536186	100,039478
0,1418896	0,17129674	20,72537
0,1040466	0,17076614	64,1246752
0,45279709	0,4329197	4,38991045
0,42489452	0,4341725	2,18359693
0,33162229	0,29972325	9,61908952
4,31E-06	-0,02955443	686332,494
1,35E-05	-0,01877825	139097,943
0,11721893	0,17633932	50,4358722
0,12981259	0,18922307	45,7663462
0,00095626	0,04213124	4305,85783
0,02660432	0,06102648	129,38558
0,0004908	-0,00454102	1025,22768
0,36251497	0,32661202	9,90385306
0,42983599	0,41847878	2,64221879
0,03017216	0,05465173	81,1329599
0,02382809	0,04755434	99,5726226
0,03059612	0,01701731	44,380828
2,90E-05	0,00676218	23241,8237
0,34646378	0,35954034	3,77429392
0,15817227	0,16952709	7,17877052
0,07008384	0,07041166	0,46775389
0,2865918	0,29765836	3,86143801
3,67E-06	-0,01284455	350428,772
0,039325	0,06885521	75,0927486
0,18600886	0,07695031	58,6308371
9,47E-07	0,02109118	2227328
0,00467205	0,01791168	283,379464
0,18747061	0,15349958	18,1207253
0,14741763	0,16190859	9,82986695
0,02500704	0,04676388	87,002893
1,50E-05	-0,01922947	128287,352
0,00096355	0,00755188	683,758133

0,45764227	0,44577718	2,59265646
0,0063305	0,00080866	87,2259866
0,1347818	0,10613148	21,2568146
0,00548552	0,00582522	6,19264392
0,40636367	0,41952285	3,23827734
0,39030412	0,34299709	12,1205571
0,11788334	0,09217747	21,8061907
0,43421703	0,40861604	5,89589622
0,30362122	0,34914052	14,9921335
3,61E-06	-0,01998794	553392,295
0,36272474	0,37904302	4,49880624
0,0458415	0,02367061	48,3642295
0,24209634	0,24623253	1,70848964
0,00457791	0,01589734	247,262276
0,42543689	0,38876717	8,61930879
ERROR PROMEDIO		89,460869

Los valores resaltados no se toman en cuenta para el cálculo del error promedio ya que son datos atípicos

Realizado por: Jaramillo, Bryan, 2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

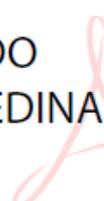
**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 30 / 08 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Bryan Alexander Jaramillo Soza</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, I=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.08.30 11:15:41 -05'00'



1627-DBRA-UTP-2021