

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA ESTUDIAR Y EVALUAR LA OPERACIÓN Y CONTROL DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Varela V., Jorge D.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2013

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA ESTUDIAR Y EVALUAR LA OPERACIÓN Y CONTROL DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Andrés Rosales.

TUTOR ACADEMICO: Prof. Domingo Ramírez.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Varela V., Jorge D.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2013

Caracas, Noviembre 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Jorge Daniel Varela Villamizar, titulado:

**“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN  
PARA ESTUDIAR Y EVALUAR LA OPERACIÓN Y CONTROL  
DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**

  
Prof. Anubis Pérez  
Jurado

  
Prof. Ali Lara  
Jurado

  
Prof. Andrés Rosales  
Tutor Académico

  
Prof. Domingo Ramírez  
Tutor Académico



## **DEDICATORIA**

Este Trabajo Especial de Grado se lo dedico a Dios que en todo momento me acompaño, me guío y me dio bastante tiempo para conocer la vida universitaria, la gente que ahí vive, trabaja y estudia.

A mis padres por tener la suficiente paciencia para mantenerme y educarme durante esta etapa de mi vida y servirme de ejemplo en todo momento.

Y a todos mis amigos por acompañarme, apoyarme y distraerme, tanto en los buenos momentos como en los malos.

A las personas que conocí en esta etapa y que tanto me han ayudado

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Dios por escucharme y acompañarme en todo momento, gracias por permitirme conocer lo mejor de toda la U.C.V. y siempre poder contar contigo en los momentos que a uno se le hace más difícil.

Gracias a esa casa que me dio comida, bebida, amigos e infinitos cuentos que hoy puedo compartirlos. Gracias U.C.V por acobijarme bajo tus techos, pasearme en tus grandes jardines y por permitirme conocerte ampliamente.

Gracias a mis Padres y a mi hermano que en todo momento me acompañaron, me corrigieron, me exigieron y me regañaron, para ser hoy el hombre que soy. Espero seguir aprendiendo en todo momento tanto de uds como de la vida. Gracias Pa, Ma y Nayus.

Gracias a Mi Gran Tutor y Prof. Andrés Rosales, a todos los profes, personal administrativo y demás que hacen vida en esta casa de estudio por enseñarme todo el tiempo el buen camino.

A TOOOODOOS mis amigos, desde los que conozco de chiquito, desde el cole, desde la uni y hasta los que no se ni como los conocí. Gracias, por permitirme aprender de uds, gracias por apoyarme en todo momento tanto en las buenas como en las malas y gracias por todos estos momentos que me han permitido estar con ustedes compartiendo esta etapa de mi vida. Al fin y al cabo todos somos hermanos con diferentes ideas pero que compartimos y disfrutamos juntos de igual manera.

Gracias a mi novia Donatella que a lo largo de la carrera me ha apoyado, guiado e incluso regañado de buena manera para que saliera bien y rápido de todo este trote que significa la carrera universitaria.

A mis hermanos de infancia Gracias por todo ese cariño que me brindan y espero que siga así, En especial a mi Marida por ayudarme siempre y sobre todo en el último tramo jeje TQM.

A esas personas que conocí aquí, que me dieron infinitas lecciones, Gracias totales.

**Varela V. Jorge D.**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA  
ESTUDIAR Y EVALUAR LA OPERACIÓN Y CONTROL DE UNA UNIDAD  
DE DESTILACIÓN**

**Tutores Académicos: Prof. Andrés Rosales. Prof. Domingo Ramírez**

**Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.  
2013, 103 pp.**

**Palabras claves:** Modelados, Simulación, Destilación, LabVIEW, MatLab, Access.

**Resumen.** Hoy día en el mundo y en Venezuela la mayoría de industrias petroleras, petroquímicas, químicas y alimenticias tienen dentro de sus procesos una unidad de destilación. Por otra parte, la programación de herramientas computacionales para simular los procesos, ha adquirido mayor importancia a medida que avanza la tecnología. Por estas razones en este trabajo se realizó un programa capaz de simular una unidad de destilación típica de un proceso industrial. Para ello, se utilizaron tres herramientas (LabVIEW, MatLab y Access) para desarrollar una interfaz que permita a un usuario programar su propia herramienta de simulación de una unidad de destilación. El presente trabajo comenzó con la selección de una planta modelada en un simulador de procesos comercial y el desarrollo de una base de datos en Access para disponer de propiedades físico-químicas de hidrocarburos livianos. Posteriormente se procedió a realizar en LabVIEW la interfaz de usuario, y MatLab se usó para resolver las ecuaciones presentes en los modelos matemáticos que permiten estimar las propiedades termodinámicas y resolver los modelos (en estacionario y dinámico) de los equipos que conforman la unidad de destilación. Seguidamente el programa desarrollado se validó con datos obtenidos de la simulación de la Planta seleccionada. Finalmente, el programa realizado permite simular un proceso de destilación que posea válvulas, bombas, intercambiadores de calor, flash y columnas de destilación, tanto en estado estacionario como dinámico permitiendo así el estudio y análisis de este tipo de industrias, siendo útil para el diseño y evaluación de los procesos de destilación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

### Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
I.2 OBJETIVOS. ....	7
I.2.1 Objetivo General.....	7
I.2.2 Objetivos Específicos .....	7
I.3 ANTECEDENTES .....	8
CAPÍTULO II.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
II.1 Simulador de Procesos.....	12
II.2 LabVIEW.....	15
II.3 MatLab.....	18
II.4. Microsoft Access .....	20
CAPÍTULO III .....	22
MARCO METODOLÓGICO.....	22
III.1 Selección de una planta como caso base, que se encuentre simulada.....	22
III.2 Análisis de grados de libertad.....	23
III.3 Elaboración de base de datos.....	26
III.4 Simulación de los equipos en estado estacionario y en estado dinámico. ....	27
III.5 Validar la herramienta desarrollada con el programa de simulación de procesos comercial. ....	28

III.6 Desarrollo de una interfaz amigable para los usuarios.....	29
III.7 Desarrollar un manual de usuario .....	29
CAPÍTULO IV .....	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
IV.1 Seleccionar una planta como caso base cuya configuración y equipos hayan sido simulada utilizando un simulador de procesos. ....	30
IV.2 Realizar un análisis de grados de libertad del proceso de destilación a simular. ....	32
IV.3 Construir una base de datos de hidrocarburos que pueda ser utilizada por la herramienta a desarrollar. ....	33
IV.4 Programar los modelos del proceso de destilación en estado estacionario y no estacionario.....	34
IV.5 Validar la herramienta, comparando y analizando los resultados que se obtienen de ella con un simulador de procesos comercial. ....	63
IV.6 Desarrollar una interfaz amigable y de fácil entendimiento para los usuarios que podrán ser estudiantes, profesionales afines y profesores. ....	69
IV.7 Desarrollar un manual de usuario. ....	70
CAPÍTULO V.....	71
V.1 Conclusiones.....	71
V.2 Recomendaciones .....	72
CAPÍTULO VI.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	73
APENDICE .....	75
ANEXOS.....	78
ANEXO 1.....	79



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.- 1 Módulo de proceso típico que muestra todas las interconexiones de información necesarias. (Himmelblau, 1997) .....	13
Figura.- 2 Arquitectura típica de un simulador genérico modular secuencial. (Scenna, 1999) .....	15
Figura.- 3 Panel frontal y Diagrama de bloques del entorno de LabVIEW .....	17
Figura.- 4 Esquema de la metodología que se empleará. ....	22
Figura.- 5 Diagrama de Flujo de la planta seleccionada (Honeywell, 2008).....	22
Figura. 6 Etapa de equilibrio con adición o sustracción de calor, corriente de alimentación y corriente lateral. (Henley & Seader, 2000).....	24
Figura.- 7 Planta de destilación seleccionada, perteneciente a un corte ligero de crudo, (Honeywell, 2008).....	30
Figura.- 8 Base de datos realizada en Microsoft Access con las propiedades físico-químicas de los componentes.....	33
Figura.- 9 Esquema general del desarrollo del programa para el proceso de destilación. ....	34
Figura.- 10 Diagrama de bloque que estima la presión de vapor.....	35
Figura.- 11 Diagrama de bloques para el cálculo de la temperatura de burbuja (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007).....	36
Figura.- 12 Diagrama de bloques para el cálculo de la temperatura de rocío (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007).....	38
Figura.- 13 Algoritmos que representa el esquema de cálculo para calcular (a) Presión de burbuja (b) presión de rocío .....	39
Figura.- 14 Trayectoria para el cálculo de entalpía de un líquido. (Henley & Seader, 2000) .....	41
Figura.- 15 Esquema general de cómo se clasifica el módulo corriente.....	44

Figura.- 16 Diagrama de bloque con la secuencia de módulos que calculan las diversas propiedades. ....	46
Figura.- 17 Interfaz para el módulo corriente presión temperatura .....	46
Figura.- 18 Esquema general de los equipos que conforman el proceso. ....	48
Figura.- 19 Interfaz de la válvula en el programa desarrollado .....	49
Figura.- 20 Interfaz desarrollada para el módulo flash. ....	51
Figura.- 21 Interfaz realizada para el modulo bomba .....	51
Figura.- 22 Interfaz del intercambiador de calor sencillo. ....	54
Figura.- 23 Interfaz para un intercambiador de tubo y carcaza.....	56
Figura.- 24 Algoritmo del método BP de Wang-Henke para destilación. (Henley & Seader, 2000).....	58
Figura.- 25 Interfaz realizada para el modulo que ejecuta la convergencia de la columna .....	59
Figura.- 26 Esquema del modelo acumulación para resolver el estado dinámico de un flash. (Honeywell, 2008).....	61
Figura.- 27 Interfaz realizada para la parte dinámica del proceso destilación flash. ..	61
Figura.- 28 Interfaz del controlador desarrollado para el programa. ....	63
Figura.- 29 Diagrama de flujo de la planta de destilación para un corte ligero. ....	63
Figura.- 30 Comparación dinámica del nivel de líquido acumulado en el flash, realizada en UNISIM Design y la herramienta desarrollada (SimProEIQ). ....	68
Figura.- 31 Interfaz de una bomba en el programa desarrollado. ....	69
Figura.- 32 Programación de la temperatura de Burbuja en Matlab script .....	80
Figura.- 33 Programación la temperatura de rocío en Matlab script.....	81
Figura.- 34 Programación del cálculo de la presión de burbuja.....	81
Figura.- 35 Programación del cálculo de presión de rocío.....	82

Figura.- 36 Programación del cálculo de la fracción de vapor. ....	82
Figura.- 37 Programación del cálculo de entalpía para el vapor.....	83
Figura.- 38 Programación para el cálculo de entalpía en el líquido.....	83
Figura.- 39 Diagrama de bloque desarrollado para el cálculo iterativo del cálculo de la temperatura para el modulo corriente presión-entalpía.....	84
Figura.- 40 Programación en el bloque de diagrama del LabVIEW para el modulo bomba.....	85
Figura.- 41 Programación en el diagrama de bloque para un intercambiador de calor sencillo. ....	86
Figura.- 42 Diagrama de bloque que ejecuta la programación del flash.....	87
Figura.- 43 Programación en el bloque de diagrama de LabVIEW para el modulo mezclador utilizado en el estado dinámico. ....	88
Figura.- 44 Diagrama de bloque desarrollado para el controlador.....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Número de variables que existen en el proceso. ....	25
Tabla N° 2 Número de ecuaciones existentes en el proceso. ....	25
Tabla N° 3 Especificaciones típicas para cubrir los grados de libertad en el proceso	26
Tabla N° 4 Especificaciones que le asigna el manual de UNISIM Design a las dos corrientes de entradas. ....	31
Tabla N° 5 Especificaciones necesarias para cubrir los grados de libertad de las operaciones unitarias que se encuentran en la planta simulada. ....	32
Tabla N° 6 Tabla comparativa donde se muestran valores de diversas variables para las primeras dos corrientes del proceso. ....	64
Tabla N° 7 Tabla que compara los resultados de composición obtenidos por el UNISIM Design y el desarrollado, para el flash y la columna. ....	65
Tabla N° 8 Tabla de datos comparando la composición para el flash y la columna de los dos estado estacionarios. ....	66
Tabla N° 9 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a las válvulas que rigen el proceso. ....	79
Tabla N° 10 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a la bomba que posee el proceso. ....	79
Tabla N° 11 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a los intercambiadores existentes en el proceso. ....	79
Tabla N° 12 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (1/4). ....	90
Tabla N° 13 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (2/4). ....	90
Tabla N° 14 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (3/4). ....	91

Tabla N° 15 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (4/4). ..... 91

Tabla N° 16 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (1/4)..... 92

Tabla N° 17 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (2/4)..... 92

Tabla N° 18 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (3/4)..... 93

Tabla N° 19 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (4/4)..... 93

Tabla N° 20 Tabla que compara los resultados de composición obtenidos por el UNISIM Design y el desarrollado, para el flash y la columna para el segundo estado estacionario. .... 94

## INTRODUCCIÓN

En el mundo y en Venezuela la mayoría de las plantas petroleras, químicas y petroquímicas poseen como proceso principal una unidad de destilación, donde entra una mezcla determinada de componentes y se obtiene productos refinados que poseen mayor valor agregado, siéndole útiles a otras empresas o usuarios finales.

De igual forma, el modelado y simulación de procesos ha cobrado una gran importancia debido al avance de la tecnología y a las ventajas que posee. Ya que con la simulación del proceso se puede mejorar el rendimiento de la planta, conseguir mejores condiciones y parámetros de operación para cada equipo, entrenar personal, entre otras características.

Por estos motivos, en el presente Trabajo Especial de Grado se busca desarrollar una herramienta de simulación que posea la capacidad de representar un proceso de destilación, donde hay diversas operaciones unitarias como pueden ser válvulas, bombas, intercambiadores de calor, flash y la columna de destilación. Con el objetivo de incluir en la Escuela de Ingeniería Química de la U.C.V una herramienta de simulación de procesos que no requiera licencia, en la cual los estudiantes y profesores puedan usarlo y apreciar cómo se realizó, y si desean puedan agregar nuevos componentes y/o módulos de equipos, asegurando así la continuidad el crecimiento y actualización del programa.

Para lograr construir la herramienta de simulación se procedió a elegir los programas que se adaptaran a las necesidades que se requieren para desarrollar la simulación, estos software fueron LabVIEW como programa principal, MatLab como programa de cálculo numérico (solver) y Microsoft Access que permite la creación de una base de datos que posee las propiedades físico-químicas de los componentes que se usan en la simulación, posteriormente se detallan las ventajas de cada programa. Luego se procedió a seleccionar una planta que se encontraba simulada. La cual proporciona todos los datos necesarios para desarrollar adecuadamente la simulación y sirve de ejemplo y guía.

Consecutivamente, se realizó un análisis de grado de libertad para cada equipo permitiendo así conocer las variables que deben ser especificadas y cuales debe dar el usuario. Luego se realizó una base de datos con las propiedades físico químicas de los componentes que se utilizan en la planta y se procedió a realizar el modelado y programación en LabVIEW, tanto en estado estacionario como en dinámico. Una vez elaborado el programa, se procedió a validarlo con la planta realizada en el simulador de procesos comercial, comparando así los resultados. Y finalmente, se procedió a realizar una interfaz amigable y un manual de usuario para mayor comprensión y entendimiento.

El presente Trabajo Especial de grado se estructuró por capítulos, donde el capítulo I contiene los fundamentos de la investigación, en el cual se presenta el planteamiento del problema, los objetivos desarrollados y los antecedentes. El capítulo II se refiere a un marco teórico, en el que se puede encontrar un resumen de las bases teóricas que fundamentan el trabajo. Seguido, el capítulo III incluye la metodología establecida para cumplir con los objetivos específicos.

En el capítulo IV se realiza el análisis y discusión de los resultados, seguidos por el capítulo V donde se mencionan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron de realizar este trabajo. En el capítulo VI se encuentra la bibliografía referenciada, y posteriormente hay una sección de apéndices donde se muestran diversas tablas, ecuaciones, correlaciones, etc., necesarios para la comprensión del trabajo, así como también el respectivo manual del programa desarrollado.

## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan las bases que sustentaron esta investigación, entre los cuales se encuentran el planteamiento del problema, el objetivo general, los objetivos específicos y los antecedentes.

#### I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día, en muchas industrias químicas, petroquímicas y petroleras poseen como operación principal una unidad de destilación que cumple con la función de separar los componentes de una corriente y obtener productos intermedios o finales de mayor valor agregado. El proceso de destilación puede ser tan complejo como el fraccionamiento de crudo, donde existen varias alimentaciones, varias salidas laterales y columnas acopladas, o tan sencillo como la destilación simple en la separación binaria de alcohol-agua (Perry, 2001).

Por otro lado, el modelado y la simulación de procesos ha incrementado su relevancia, tanto en estudios universitarios, como en diversos proyectos de ingeniería química, conformando así una gran herramienta de ayuda para el diseño, la evaluación de la operación y el control de un proceso. En la actualidad, existen una variedad de programas comerciales en los que se pueden realizar múltiples estudios y análisis, al tener la simulación del proceso. Satisfaciendo así, las necesidades de empresas a nivel mundial.

Entre las principales ventajas poseen estos simuladores se destacan las siguientes:

- La capacidad de predecir y analizar el comportamiento de procesos reales bajo diferentes escenarios de operación sin necesidad de tener que realizar pruebas de campo que podrían ser inseguras.
- Comparar y evaluar distintas alternativas sin modificar la planta real y en función de los resultados obtenidos tomar una decisión, logrando así una mejora de un proceso existente



- Estudiar la dinámica de un proceso existente de una manera más rápida y segura ante distintas perturbaciones y diseñar un sistema de control adecuado.
- A través de algoritmos previamente programados se puede obtener una optimización de los procesos.

Entre los programas más conocidos y usados a nivel mundial se encuentran el PRO II, AspenPlus, Hysys, entre otros. Sin embargo, su adquisición y uso requiere de una gran inversión porque se necesita de una licencia y un personal que sea capaz de manejarlo. Esto se traduce en costos adicionales de cursos, mantenimiento y actualización del programa.

Por estos motivos, el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado es desarrollar una herramienta de simulación que posea parte de la versatilidad y funcionalidad de un simulador de procesos comercial, que sea capaz de modelar y simular una unidad de destilación limitada a un grupo de equipos, tales como válvulas, bombas, intercambiadores, destilación flash y destilación compleja multicomponente. De igual manera, el programa desarrollado tiene la característica que se le puede agregar nuevos módulos de equipos, que un usuario con conocimientos en el área (profesores, estudiantes, etc) desee.

Para desarrollar un simulador de procesos, es necesario definir y conocer las herramientas adecuadas para realizarlo. Es por ello, que antes de construirlo se requiere saber cómo trabajan estos simuladores comerciales y que programas existen en el mercado que ofrecen los requisitos necesarios para los desarrolladores (programadores) de programas de simulación.

Para ello, se seleccionaron los siguientes programas, donde cada uno posee una serie de características y ventajas que serán mencionadas posteriormente:

- LabView.
- MatLab.
- Microsoft Access.

El LabVIEW es usado como programa principal debido a que trabaja de manera modular, permite la adquisición de datos externos, la automatización y control de

---

equipos. Además, posee una interfaz amigable para el programador, donde se puede manipular con facilidad las variables del proceso simulado y apreciar el resultado de una manera rápida.

El LabVIEW es un programa económico de última generación, que puede ser compatible con el desarrollo tecnológico realizado en el futuro. Actualmente, la Escuela de Ingeniería Química, en la sala de computación, se cuenta con la licencia del programa.

El MatLab es un lenguaje de alto nivel reconocido a nivel mundial, que posee un entorno interactivo para el cálculo numérico; así como también permite la visualización y programación. Con esta herramienta es posible realizar cálculos matemáticos de una manera sencilla, ya que posee una gran cantidad de utilidades y métodos numéricos que permiten al usuario crear funciones específicas para así llegar a la solución de una manera rápida. El MatLab posee una herramienta que compila todo lo realizado en el código y lo transfiere a lenguaje C/C++ trayendo más ventajas tales como la capacidad de crear archivos ejecutables. El programa dispone de versiones de prueba gratuitas en internet, fácilmente descargables y en caso de requerirlo es económicamente accesible.

El Microsoft Access es un programa que se encuentra en el paquete de Microsoft Office que sirve para recopilar y organizar información, es decir, que funciona como una base de datos, teniendo como principales ventajas:

- Agregar, modificar y eliminar datos de una manera sencilla de una base de datos.
- Organizar y filtrar la información de datos según requiera el usuario.

Debido a esto, el programa se utilizó para disponer de manera ordenada la información referente a propiedades de los componentes que son usados en el programa.

En este orden de ideas, para los desarrolladores y/o empresas, el adquirir las licencias de los tres programas utilizados es mucho más económico que el de un simulador comercial, ya que el conjunto de estas tres herramientas representan para una empresa

---

una inversión significativamente inferior (100 veces menos) que un simulador comercial.

El programa desarrollado usando la potencialidad de los tres programas mencionados (LabVIEW, MatLab y Microsoft Access), ofrece como ventaja la capacidad de compilarse, donde se crea un archivo instalador y uno ejecutable que puede ser visualizado en cualquier máquina que no posea los programas. Por ende, el producto final podría ser comercializado sin dependencia de ningún programa específico que requiera licencia, siendo así más llamativo al momento de ofrecer el producto ante una empresa.

## **I.2 OBJETIVOS.**

### **I.2.1 Objetivo General**

Desarrollar una herramienta de simulación de una unidad de destilación en lenguaje de programación que permita estudiar, evaluar y controlar el proceso.

### **I.2.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar una planta como caso base, cuya configuración y equipos hayan sido simulados utilizando un simulador de procesos.
- Realizar un análisis de grados de libertad del proceso de destilación a simular.
- Construir una base de datos de hidrocarburos que pueda ser utilizada por la herramienta a desarrollar.
- Programar los modelos del proceso de destilación en estado estacionario y no estacionario.
- Desarrollar una interfaz amigable y de fácil entendimiento para los usuarios que podrán ser estudiantes, profesionales afines y profesores.
- Validar la herramienta desarrollada, comparando y analizando los resultados que se obtienen de ella y de un simulador de procesos comercial.
- Desarrollar un manual de usuario.

### I.3 ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan y explican los diversos trabajos que se han realizado con respecto al desarrollo de herramientas de simulación, así como también trabajos de investigación relacionados con el modelaje y simulación de diversas operaciones unitarias.

**Azancot, L., (2010).** En su Trabajo Especial de Grado desarrolló el modelado y simulación de una columna de destilación recuperadora de metanol de la planta METOR, dando respuesta, tanto en estado estacionario como en dinámico, con la finalidad de desarrollar e implementar el proyecto de Ambiente de Simulación y Entrenamiento de la Planta (ASEP). La incorporación de esta tecnología permite mejorar la capacitación del talento humano, así como entrenar y dotar al personal con herramientas tecnológicas que permiten una operación más eficiente y segura en la planta.

Para el desarrollo de la simulación, utilizó el lenguaje de programación de MatLab, donde en la parte estacionaria utilizó el método de punto de burbuja (BP) para determinar la temperatura y composición a lo largo de la columna. En la estimación del punto de equilibrio utilizó el modelo termodinámico UNIQUAC y la eficiencia de Murphree la determinó con datos reales de planta. El modelado dinámico se basó en la acumulación de líquido entre etapas, que es capaz de reproducir el comportamiento de las variables en el tiempo, ante una perturbación en la entrada, su modelo fue validado mediante simuladores comerciales tales como PROII y Hysys demostrando una correspondencia en los resultados, con un margen de error menor al 5%.

El modelo que Azancot desarrolló en MatLab puede ser fácilmente ajustable y modificado para plantear y simular otra configuración de torre, que funcione con otros componentes. En este Trabajo Especial de Grado se usó dicho modelo, realizando los ajustes necesarios para simular la columna.

**Drésden, B. y Franceschi, F. (2010).** En su trabajo Especial de Grado modelaron y simularon los intercambiadores de calor más comunes en la industria (doble tubo, de carcasa y tubos y de placas), para realizar estudios de evaluación, operación y control, usando el lenguaje de programación LabView. Para ello, realizaron una base de datos con propiedades fisicoquímicas de compuestos, particularizando a hidrocarburos ligeros y alcoholes que pudieron conectarla fácilmente al programa creado. También, lograron adaptar y desarrollar los modelos matemáticos para evaluar los diversos intercambiadores, tanto en estado estacionario como en dinámico. En el programa que realizaron, consiguieron calcular diversas propiedades tanto en fase líquida como de vapor, así como también lograron crear un archivo ejecutable que puede ser fácilmente instalado en cualquier computadora que posea ambiente Microsoft Windows.

El trabajo desarrollado tiene importancia ya que se puede apreciar que tiene la estructura básica de un simulador, debido a que se desarrolla una interfaz que posee una base de datos. En su modelo usan una secuencia de módulos, tanto para calcular propiedades, como para realizar los cálculos de los diferentes intercambiadores. En la interfaz, el usuario debe llenar una serie de celdas para cumplir los grados de libertad y el programa realiza los cálculos pertinentes para así evaluar el intercambiador. También, en el programa es posible cambiar de estado estacionario a dinámico con solo un botón, siempre y cuando se tenga previamente el estado estacionario calculado.

La herramienta desarrollada en este Trabajo Especial de Grado también sigue un esquema similar al planteado por Drésden y Franceschi (2010), con el objetivo de acercarse lo más posible a un simulador comercial. En especial, el programa de conectividad entre el Microsoft Access y el LabVIEW, que se usó en la herramienta desarrollada

**Blanco, E., Inciarte, M. y Mora, J., (2010).** Desarrollaron un trabajo donde crean un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés) para una columna de destilación de benceno-tolueno, permitiendo supervisar y controlar las variables críticas de forma remota, pudiendo así observar alarmas generadas en tiempo real, el comportamiento de variables en función del tiempo y almacenar los valores en una base de datos. Simularon el proceso de destilación utilizando la herramienta Simulink de MatLab y para la interfaz del SCADA utilizaron el lenguaje de programación LabView de National Instruments.

El trabajo mencionado tiene relevancia porque se pueden colocar sistemas de alarmas y de control a las diversas operaciones unitarias; aunque ellos usaron la herramienta Simulink que dispone el MatLab para controlar la columna.

En este Trabajo Especial de Grado, se modeló el sistema de control de la torre usando el programa LabVIEW, ya que este es ideal para realizar una interfaz hombre-máquina. Por tanto, sirve para desarrollar a futuro un ambiente de simulación para entrenamiento de operadores con diversas alarmas, botones y fácil de manipular.

**Aristimuño, A. (2012).** En su Trabajo Especial de Grado realizó un programa capaz de monitorear y controlar la torre de destilación continua del Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U.) de la Escuela de Ingeniería Química de la U.C.V. Para ello, utilizó el programa de LabView donde diseñó y creó una interfaz que junto a una tarjeta de adquisición de datos (NI USB6009) logró monitorear diversas variables y por medio de gráficas mostró el comportamiento en función del tiempo. De igual forma, logró identificar y programar diferentes lazos de control de la unidad de destilación y realizó la publicación de variables de planta usando un protocolo de internet llamado User Datagram Protocol (UDP). Éste permite visualizar el comportamiento de las variables en tiempo real y en cualquier espacio físico, sea un salón, oficina u otro laboratorio que posea conexión a internet.

El trabajo realizado por Aristimuño (2012), tiene importancia ya que teniendo la columna automatizada se puede desarrollar posteriormente, con algoritmos

adecuados, una herramienta de mejoras y optimización que se vincule con la simulación realizada en este Trabajo Especial de Grado. Por ello, la herramienta desarrollada quedó lo más configurable posible, para así realizar la simulación de diferentes plantas de procesos que incluyan las operaciones unitarias desarrolladas en este trabajo (válvulas, bombas, flash, intercambiadores de calor y columna de destilación).



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta de manera general las bases teóricas que fundamentan este Trabajo Especial de Grado.

#### **II.1 Simulador de Procesos**

A lo largo de la historia siempre se ha buscado calcular propiedades de corrientes, comportamientos de equipos, entre otras características en procesos industriales. En los inicios de la industrialización se partía de hipótesis, o se suponían, en base a la experiencia. Sin embargo, con el paso del tiempo y al avance de la tecnología en los últimos años se han desarrollado programas computacionales para simular el comportamiento de sistemas de ingeniería de todo tipo (Scenna, 1999).

Hoy en día, se conocen como *Simuladores de Procesos* a la herramienta computacional que un usuario con conocimientos sobre operaciones unitarias, puede usar para realizar un diagrama de flujo de un proceso o planta, especificando el desempeño de la red de corrientes y equipos.

El simulador de procesos es el programa que resuelve los balances de masa, energía y cantidad de movimiento en estado estacionario y/o dinámico, según lo requiera el usuario. En la simulación, el problema esencial radica en resolver y satisfacer un conjunto de ecuaciones tanto lineales como no lineales, con un grado de precisión aceptable, que generalmente se realiza a través de un procedimiento iterativo. No obstante, para lograr resolver las ecuaciones se necesitan especificar y/o conocer suficientes valores o datos que cubran los grados de libertad que tiene el proceso. Es por ello que en este Trabajo Especial de Grado se utiliza un programa matemático, tal como MatLab, que permite resolver ecuaciones de una manera rápida y sencilla.

Por otro lado, el programa debe facilitar la transferencia de información entre equipos, tener una base de datos confiable (Ej. Microsoft Access que permite crear base de datos) y tener la flexibilidad para aceptar especificaciones de equipos dadas por el usuario. Además, debe contar con un programa maestro que vincule todos los

bloques de construcción, los datos de propiedades físicas, cálculos termodinámicos, subrutinas y que supervise el flujo de información, que para la herramienta a desarrollar se empleó el LabVIEW ya que posee las características necesarias para ser utilizado como programa principal (Himmelblau, 1997).

Hoy en día, los simuladores comerciales que existen en el mercado se han realizado bajo dos metodologías de resolución que se presentan a continuación:

- a) El *método de simulación orientado a ecuaciones*, donde se escribe el conjunto de ecuaciones y desigualdades que representan el proceso, incluyendo los balances de masa y energía, las conexiones de las corrientes y las diferentes relaciones que representan los equipos.

Este conjunto de ecuaciones se pueden resolver simultáneamente empleando diversos programas de computadora apropiados y/o siguiendo métodos de resolución planteados en diversas bibliografías de ingeniería química.

- b) El *método modular* es donde el proceso se representa como una serie de módulos en los que las ecuaciones (y otra información), que constituyen un equipo o un subsistema, se reúnen y codifican de tal manera que puede ser usado independientemente y pueda emplearse tantas veces se requiera en el diagrama de flujo (DFP) definido por el usuario.

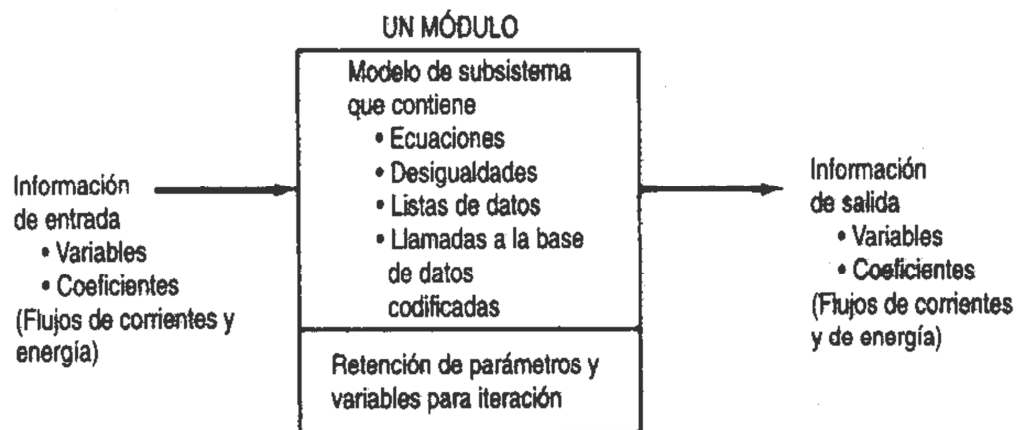


Figura.- 1 Módulo de proceso típico que muestra todas las interconexiones de información necesarias. (Himmelblau, 1997)

Como se aprecia en la Figura.- 1, cada módulo es un modelo de un elemento individual del DFP (ejem. un flash, una bomba, etc.), que se puede analizar, depurar e interpretar por sí solo. Este módulo contiene las relaciones de balance de masa y energía, las condiciones y propiedades de las corrientes que entran y salen de él.

Actualmente, el método modular secuencial es el que se incluye con mayor frecuencia en simuladores comerciales, ya que históricamente fueron los primeros en desarrollarse y han ido mejorando con el tiempo. Así mismo, el diagrama de flujo de la información incluye un módulo para cada unidad de proceso.

Esta estrategia de resolución para realizar un simulador de procesos ofrece una serie de ventajas para los diseñadores y usuarios, entre las que cabe destacar:

- La arquitectura del diagrama de flujo se entiende fácilmente porque sigue de cerca el diagrama de flujo del proceso.
- Es fácil agregar programas y modelos individuales al paquete de software o quitarlos de él.
- Es posible añadir módulos al diagrama de flujo o eliminarlos sin dificultades y sin afectar otros módulos
- El usuario de un programa basado en módulos debe proporcionar:
  1. La operación unitaria que representa el modulo.
  2. Información sobre las corrientes de entrada, incluidas propiedades físicas y conexiones.
  3. Parámetros de diseño requeridos en los módulos y las especificaciones de los equipos.
  4. Criterios de convergencia y la rigurosidad de cálculo, que implica los distintos conjuntos de hipótesis que definen el nivel de exactitud de los resultados provistos.

En la siguiente figura, se muestra la estructura general que posee un simulador modular secuencial y como es el intercambio de información entre los distintos módulos.

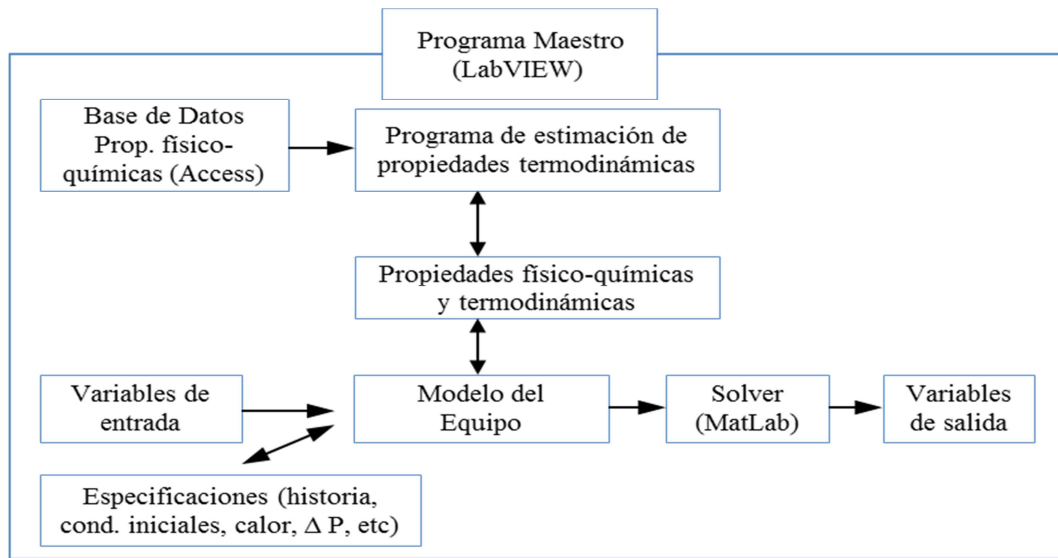


Figura.- 2 Arquitectura típica de un simulador genérico modular secuencial. (Scenna, 1999)

En la Figura.- 2 se aprecia que los simuladores deben contar con una base de datos (Access) con las propiedades físico-químicas de los componentes que manejan, unas subrutinas o módulos que calculen las propiedades fisicoquímicas, termodinámicas y de transporte, que junto a las variables de entrada (calculadas o dadas por el usuario), ingresan al modelo del equipo y este usando un sistema de ecuaciones (MatLab) se soluciona, generando así las variables de salida respectivas. Todo esto debe estar concentrado en un programa principal o maestro, que ejecute los diversos parámetros que requieran los módulos y que manipule toda la información del proceso de manera organizada y coherente.

## II.2 LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los que se desarrollan con lenguaje C o BASIC. Sin embargo, se diferencia de dichos programas que se basan en líneas de texto para crear el código fuente, en que LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G, para crear sistemas basados en diagramas de bloques. Por lo que constituye un sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación

de datos. Las ventajas que proporciona utilizar este programa se resumen en las siguientes:

- a) Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender, para ingenieros, ya que posee analogía con un simulador de procesos.
- b) Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- c) Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- d) Posee un único sistema de desarrollo, donde se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos. Ya que tiene una gran disponibilidad de herramientas, útiles para desarrollar por ejemplo sistema de entrenamiento de operadores (OTS).
- e) El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- f) Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes, como el caso de MatLab que se vincula como Script.

Los programas desarrollados en LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), debido a que su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento o módulo real. Sin embargo, son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente.

Como se puede apreciar en la Figura.- 3 todos los VIs constan de un panel frontal, un diagrama de bloques y paletas que contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs. A continuación, se procede a realizar una breve descripción de estos:

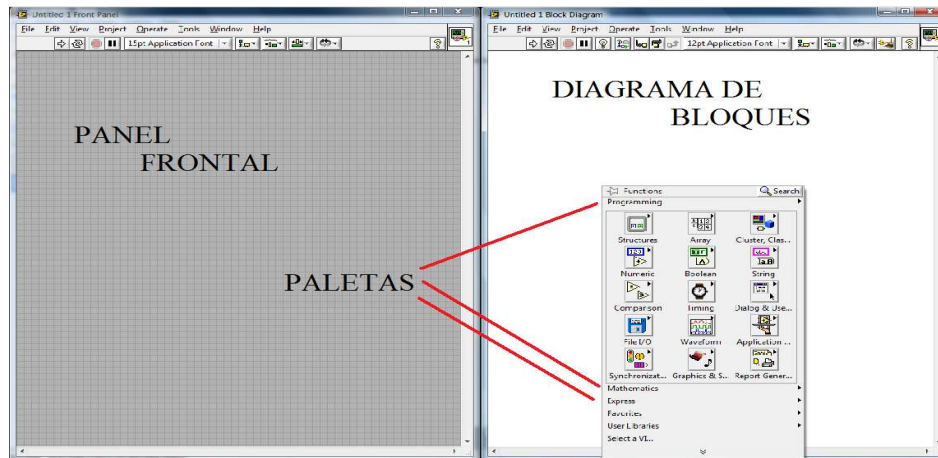


Figura.- 3 Panel frontal y Diagrama de bloques del entorno de LabVIEW

El *panel frontal* es utilizado para interactuar con el usuario cuando el programa está corriendo. Los usuarios pueden controlar el programa, cambiar entradas y ver datos actualizados en tiempo real. Los controles son usados como entrada y los indicadores como salida. Cada control o indicador del panel frontal tiene una terminal correspondiente en el diagrama de bloques. Cuando un VI se ejecuta, los valores de los controles fluyen a través del diagrama de bloques, en donde estos son usados en las funciones del diagrama, y los resultados son pasados a otras funciones o indicadores. (National Instruments, 2003)

El *diagrama de bloques* se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si se tratara de un circuito. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes; así como también, son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

Las *paletas* de funciones contienen todos los objetos necesarios para crear y modificar el VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa, etc. (National Instruments, 2003)

LabVIEW sigue un modelo de flujo de datos para correr los VIs. Un módulo del diagrama de bloque se ejecuta cuando todas sus entradas están disponibles. Cuando éste completa la ejecución, suministra datos a sus terminales de salida y transfiere los datos al siguiente módulo en la trayectoria del flujo de datos.

También se puede crear un subVI, que es un VI que puede ser utilizado dentro de otro VI, similar a una subrutina. Al crear un subVI se obtiene diversas ventajas entre las cuales destacan:

- Su utilización es modular.
- Fácil para eliminar errores.
- No se tiene que crear códigos constantemente.
- Requiere menos memoria en la computadora.

En base a los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, se utilizó el LabVIEW para crear la interfaz usuario-computador con el fin de realizar el programa principal, ya que gracias a su programación gráfica (fácil entendimiento), a la capacidad de desarrollar subVIs, permite estructurar la interfaz como si fuese un simulador comercial, gracias a las múltiples herramientas que dispone y la capacidad de interactuar con otros lenguajes de programación.

### **II.3 MatLab**

La primera versión de MatLab data de los años 70 y fue diseñada como herramienta de apoyo para los cursos de Teoría de Matrices, Álgebra Lineal y Análisis Numérico. El nombre MatLab es un acrónimo: “MATrixLABoratory”. En la actualidad, es un programa muy potente, con un entorno agradable, que incluye herramientas de cálculo científico y técnico, y de visualización gráfica; así como un lenguaje de programación de alto nivel.

El MatLab es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular, se puede también trabajar con números escalares, tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. (García de Jalón, Rodríguez, & Vidal, 2005).

En el mundo industrial, MatLab es utilizado como herramienta de investigación para la resolución de problemas complejos planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta se encuentran en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal entre otras.

Para ciertas operaciones, MatLab se torna muy rápido, cuando ejecuta sus funciones en código nativo con los tamaños más adecuados para aprovechar sus capacidades de vectorización. En otras aplicaciones, resulta más lento que el código equivalente desarrollado en C/C++ o Fortran. El lenguaje de programación de MatLab siempre es una herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y como se ha dicho, aumenta la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo. El programa dispone de un código básico y de varias librerías especializadas (*toolboxes*) (García de Jalón, Rodríguez, & Vidal, 2005); que trabajadas en conjunto, pueden desarrollar herramientas complejas de modelado y simulación de cualquier proceso.

MatLab se utiliza ampliamente en:

- Cálculos numéricos
- Desarrollo de algoritmos
- Modelado, simulación y prueba de prototipos
- Análisis de datos, exploración y visualización
- Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (*GUI*, *Graphical User Interface*).

Debido a su compatibilidad y sencillo uso con el programa principal utilizado LabVIEW (usando scripts) y conociendo que para realizar un simulador de procesos se requiere un solver y/o una herramienta matemática que facilite el modelado y los cálculos de los equipos, se utilizó el MatLab, ya que también posee reconocimiento y confiabilidad a nivel mundial por su amplitud de usos.



#### **II.4. Microsoft Access**

Microsoft Access es el Sistema Gestor de Bases de Datos (SGBD) de Microsoft Office. Una base de datos es un conjunto de datos que están organizados y reunidos para un uso determinado. El objetivo principal de éstas es unificar los datos que se manejan y los programas o aplicaciones que los manipulan.

Anteriormente, los programas se codificaban junto con los datos; es decir, se diseñaban para la aplicación específica que los iba a manejar. Esto generó una dependencia de los programas respecto a los datos, ya que la estructura de los ficheros se incluía dentro del programa y cualquier cambio en esta estructura provocaba modificar y recompilar programas. Además, cada aplicación utilizaba ficheros que podían ser comunes a otras de la misma organización, por lo que se producía una redundancia de la información que provocaba mayor ocupación de memoria, laboriosos programas de actualización e inconsistencia de datos si los datos no eran bien actualizados o ubicados en todos los programas. (Universidad de Alicante, s.f)

Con las bases de datos, se busca independizar los datos y las aplicaciones; es decir, mantenerlos en espacios diferentes. Los datos residen en la memoria, y los programas mediante un sistema gestor de bases de datos, manipulan la información. Cada programa requerirá de una cierta información de la base de datos y habrá otros que utilicen los mismos datos. Sin embargo, estos residirán en el mismo espacio de almacenamiento y los programas no duplicarán esos datos; si no que, trabajarán directamente sobre ellos concurrentemente y, aunque la estructura de la base de datos cambie, los datos modificados no afectarán a un programa específico. Por lo que éste no tendrá por qué ser alterado.

Actualmente, la mayoría de los SGBD almacenan y tratan la información utilizando el modelo de gestión de bases de datos relacional. En un sistema de base de datos relacional, los datos se organizan en tablas que son el núcleo de cualquier base de datos. Todos estos se introducen en la base de datos que se irán almacenando en la

tabla o tablas correspondientes. En cada una de estas tablas, interesa tener almacenada información diversa relacionada con los datos que se utilicen.

La apariencia física de una tabla en Access es cómo una hoja de cálculo, donde la información se puede ver distribuida en filas, columnas y celdas. Las filas almacenan toda la información perteneciente a un elemento. Las columnas o campos contienen la información relativa a un determinado tipo de información dentro de la tabla; por tanto, toda la información almacenada en un campo va a ser del mismo tipo.

Un **Sistema de Gestión de Bases de Datos** (SGBD) es un conjunto de programas que permite a los usuarios crear y mantener una base de datos. El SGBD es el que recibe la petición por parte del programa para manipularlos y es el encargado de recuperar la información de la base de datos y devolvérsela al programa que la solicitó. Este sistema permite:

*Definir la base de datos:* que consiste en especificar los tipos de datos, las estructuras y las restricciones de los mismos.

*Construir la base de datos:* es el proceso de guardarlos en algún medio de almacenamiento controlado por el SGBD.

*Manipular la base de datos:* que consiste en funciones de consulta para obtener datos concretos, de actualización para reflejar cambios en las especificaciones de los mismos y de generación de informes.

En resumen, un **Sistema de Base de Datos** es el conjunto formado por la base de datos y el programa para la manipulación.

Es por ello que, para realizar el programa, y que sea genérico, de manera tal que pueda agregarse en un futuro cualquier componente que una persona necesite, se desarrolla la base de datos, la cual sin mayor complicación, teniendo las diversas propiedades del componente (extraídas de la bibliografía o simuladores comerciales), puede anexarlo a la base de datos, logrando así expandirla y mejorar el programa que se realiza en este Trabajo Especial de Grado.

Esto agrega una ventaja, ya que no requiere otra herramienta extra para que el programa desarrollado utilice propiedades fisicoquímicas de otros componentes a los predeterminados.

---

## CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

En la Figura.- 4 se describe la secuencia que se llevó a cabo, para el desarrollo de los objetivos que se establecieron para este Trabajo Especial de Grado.

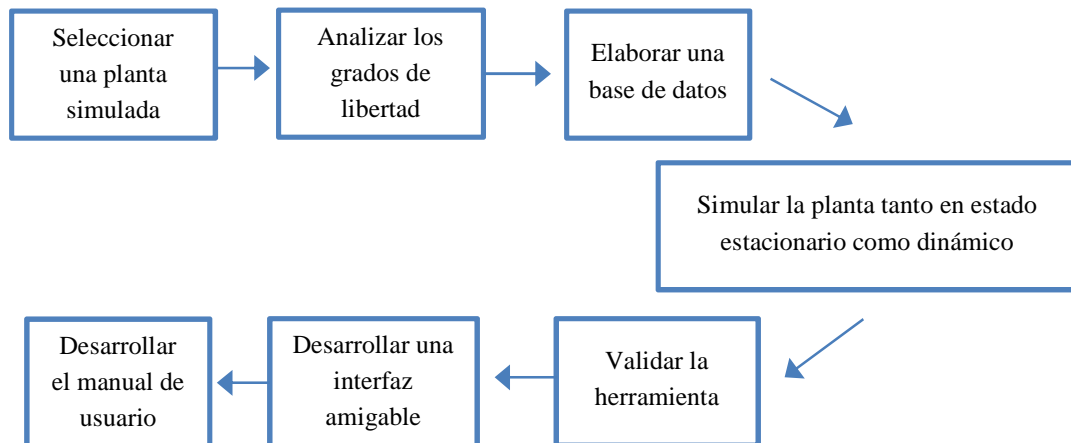


Figura.- 4 Esquema de la metodología que se empleará.

### III.1 Selección de una planta como caso base, que se encuentre simulada.

En este caso se selecciona una unidad de destilación ya simulada en un programa simulador de procesos, en el que se incluye una columna de destilación y otras operaciones unitarias de proceso para así apreciar la versatilidad del mismo. Para ello se eligió una planta que se encuentra en el Manual de UNISIM Design, mostrada en la Figura.- 5 donde se realiza un proceso de destilación para un corte ligero de crudo.

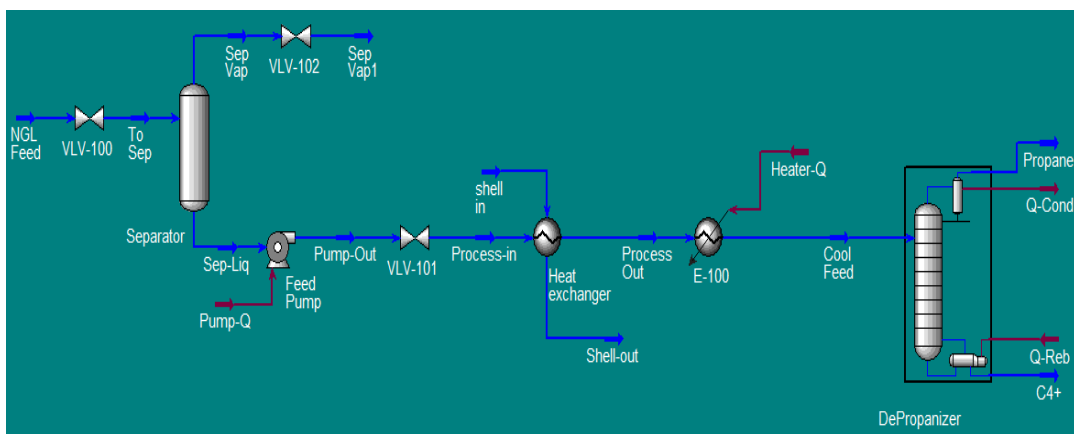


Figura.- 5 Diagrama de Flujo de la planta seleccionada (Honeywell, 2008)

En este Trabajo Especial de Grado se desarrolló y modeló los procesos unitarios de la planta apreciada en la Figura.- 5, entre los cuales se encuentran un flash, válvulas, una bomba, dos intercambiadores y una columna de destilación de condensación parcial, donde ésta es una despropanizadora, que por el tope sale una corriente rica en propano (C3) y por el fondo una corriente líquida de butano (C4+).

La importancia que se encuentre simulada la planta, es que se poseen los datos de las corrientes de entrada, las dimensiones de los equipos, las especificaciones necesarias que la definen y la información referente a las corrientes de salida. Evitando así la necesidad de tomar muestras, datos de la planta real y la experimentación necesaria. Todo ello implica que se supone que la planta simulada representa una planta real. Teniendo como ventaja que se posee toda la información para realizar la validación de la simulación que se realiza en este trabajo.

### **III.2 Análisis de grados de libertad.**

En este Trabajo Especial de Grado se realizó un análisis de grados de libertad para conocer y seleccionar las variables que el usuario final debe especificar en cada equipo del proceso y evitar tener problemas al momento de realizar los cálculos.

Una vez seleccionado la configuración y los equipos que definen el proceso, se analizó cada operación, y se determinó cuántas variables pueden ser especificadas por el usuario, para así definir completamente el sistema a simular.

Para ello se debe tener en cuenta que el número de variables especificadas por el usuario ( $n_{inc}$ ) y el número de ecuaciones ( $n_{ind}$ ) que rigen determinado equipo deben ser iguales. El análisis se realizó para la planta en estudio, tanto en estado estacionario como en dinámico.

Para realizar el análisis se tomó en cuenta la cantidad de componentes, la presión, la temperatura y el flujo que circulan en cada corriente del proceso. Posteriormente, se identifica el número de ecuaciones que la definen como son los balances de masa global, por componente y energía correspondientes a la corriente, así como también

se considerarán las diversas ecuaciones independientes que rigen las distintas operaciones unitarias establecidas, siguiendo así la siguiente ecuación:

$$n_{df} = n_{inc} - n_{ind} \tag{1}$$

Donde:

$n_{df}$ : grados de libertad del proceso (adim).

$n_{inc}$ : número de variables (adim).

$n_{ind}$ : número de ecuaciones independientes (adim).

Para el caso de una corriente, que es el elemento más simple con el cual un usuario puede encontrarse, se tiene que las variables involucradas son:

	$n_{inc}$
Composición	C-1
Flujo	1
Temperatura	1
Presión	1
	<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/>
	C+2

Por lo que una corriente homogénea contribuirá solamente con C+2 variables, dentro del proceso. Como no hay relaciones (ecuaciones) que restrinja una corriente de una sola fase entonces  $n_{ind} = 0$  y por ende los grados de libertad de una corriente quedan definida como  $n_{df} = n_{inc} = C+2$ . (Smith B. D., 1983)

Con la intención de no extender el presente trabajo, se ejemplifica el análisis de grados de libertad únicamente, para una etapa de equilibrio con adición o sustracción de calor, una corriente de alimentación y una salida lateral mostrada en la figura 6. Para el resto de los equipos, se realiza un procedimiento similar.

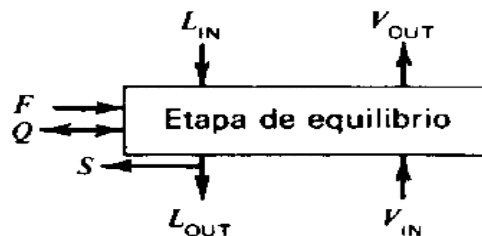


Figura. 6 Etapa de equilibrio con adición o sustracción de calor, corriente de alimentación y corriente lateral. (Henley & Seader, 2000)

Como se aprecia en la figura 6, la etapa de equilibrio posee en total, tres corrientes de entrada ( $F$ ,  $L_{in}$ ,  $V_{in}$ ) y tres de salida ( $S$ ,  $L_{out}$ ,  $V_{out}$ ) y una corriente de energía ( $Q$ ) que transmite calor hacia o desde la etapa con una velocidad  $Q$  (donde un valor positivo representa la adición de calor a la etapa).

La corriente de alimentación no tiene valores de las variables comunes con ( $L_{in}$ ) y ( $V_{out}$ ). Sin embargo, la corriente lateral es idéntica en composición, temperatura y presión a ( $L_{out}$ ).

A continuación en la Tabla N° 1, se presenta especificado el número de variables presente para la etapa de equilibrio mostrada en la figura 6.

Tabla N° 1 Número de variables que existen en el proceso.

Corriente entrada ( $F$ )	$C+2$
Corriente entrada líquido ( $L_{in}$ )	$C+2$
Corriente entrada Vapor ( $V_{in}$ )	$C+2$
Corriente salida ( $S$ )	$C+2$
Corriente salida de líquido ( $L_{out}$ )	$C+2$
Corriente salida de Vapor ( $V_{out}$ )	$C+2$
Corriente de energía ( $Q$ )	1
Total	$6(C+2)+1 = 6C+13$

Se conoce que las corrientes que salen  $V_{out}$ ,  $L_{out}$  y  $S$  están en equilibrio, y que el sistema posee restricciones de equilibrio, así como balances de masa y de energía, y además, las fracciones molares de  $L_{out}$  y  $S$  son iguales por lo que se considera como  $C-1$  igualdades de fracción molar. Por consiguiente en la Tabla N° 2 se muestra el número de ecuaciones que relacionan las variables.

Tabla N° 2 Número de ecuaciones existentes en el proceso.

Igualdades de presión	2
Igualdades de temperatura	2
Relaciones de equilibrio	$C$
Balance de masa total	1
Balance de masa por componente	$C-1$
Balance de energía	1
Igualdad de fracción molar	$C-1$
Total	$3C+4$

Ahora restando el número de variables menos el número de ecuaciones utilizando la ecuación (1) se obtiene que:

$$N_{df} = (6C+13) - (3C+4) = 3C+9.$$

Por lo tanto para cubrir los grados de libertad, típicamente en una simulación de procesos, el usuario debe especificar las tres entradas y tres variables referentes al proceso, explicadas en la tabla N° 3.

Tabla N° 3 Especificaciones típicas para cubrir los grados de libertad en el proceso

Corrientes de entrada (Lin, Vin, F)	3(C+2)
Especificaciones del proceso (Pres., S, Q)	3
Total	3C+9

Para el estado dinámico, el análisis de grado de libertad en los equipos sigue el mismo procedimiento desarrollado en el estado estacionario, solo difiere en el caso de los equipos que son acumuladores (nodos-presión), como son el flash, tanques, columnas, reactores, entre otros. Donde se considera la acumulación como una corriente más (C+2). (Abdul, 1998)

### III.3 Elaboración de base de datos.

La herramienta desarrollada en este Trabajo Especial de Grado, requiere conocer los componentes con los que se va a trabajar. Para ello se realizó una base de datos con los datos físicos químicos de los componentes que utiliza la planta simulada, y estos son los que dispone el programa:

Hidrocarburos livianos: etano, propano, n-butano, i-butano, n-pentano, i-pentano, hexano.

Las propiedades no dependientes de la temperatura de todos los componentes (peso molecular, presión crítica, etc.) se obtuvieron del (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007) y de diversos simuladores comerciales como son UNISIM Design, Hysys, PROII, entre otros. De igual manera se utilizaron las correlaciones que poseen estos simuladores y bibliografía ingenieril, para calcular las propiedades físico-químicas que dependen de la temperatura como son la densidad, calor específico, entre otras.

La herramienta desarrollada para utilizar estas propiedades físico-químicas requiere realizar subprogramas que lo conecten con Microsoft Access donde se encuentran las propiedades. Estos subprogramas fueron desarrollados en la Tesis de (Drésden & Franceschi, 2010), por lo que en el presente Trabajo Especial de Grado se reprogramó realizando los ajustes necesarios.

#### **III.4 Simulación de los equipos en estado estacionario y en estado dinámico.**

Inicialmente, con el LabVIEW se desarrolló una serie de programas que permiten obtener las propiedades físico-químicas de los componentes que selecciona el usuario. Las propiedades termodinámicas como punto de burbuja y rocío (presión y temperatura), la entalpía, la entropía, entre otras fueron calculadas según la metodología mencionada en el Smith Van Ness.

El modelo matemático para cada operación unitaria en estado estacionario se realizó analizando, estudiando y comprendiendo la teoría correspondiente a la bibliografía relacionada con cada equipo, usando en gran parte el (Henley & Seader, 2000). Para el caso de la torre de destilación se utilizó el modelo desarrollado por (Azancot, 2010), ya que pudo ser modificado para desarrollar la columna despropanizadora.

Posteriormente, luego de haber estudiado y revisado los modelos matemáticos de cada operación unitaria en estado estacionario, se procedió a realizar la programación de los equipos que definen la planta. Todo esto se llevó a cabo usando las múltiples herramientas que dispone el LabVIEW. El programa desarrollado tiene una estructura modular secuencial, para facilitar su entendimiento y/o posterior modificación, donde inicialmente se programó todas y cada una de las ecuaciones que forman parte del modelo matemático correspondiente a cada operación unitaria, para luego ser utilizadas como sub-programas interconectados mediante líneas, y crear la herramienta de simulación final.

Para el estado dinámico de manera similar al desarrollo del programa en el estado estacionario, una vez obtenido y comprendido el modelo dinámico para cada equipo, se procedió a realizar la programación de los mismos.



El programa fue realizado usando el lenguaje de LabView y la herramienta matemática MatLab ya que permiten resolver ecuaciones sencillas y complejas (ecuaciones diferenciales y sistemas de ecuaciones no lineales), sin necesidad de programar los métodos numéricos para la resolución de ecuaciones.

Consecutivamente, después de haber creado los subprogramas (módulos) referentes a cada equipo (en forma de subVi), se crea un programa principal donde se almacenan todos en un conjunto, el cual se define como proyecto. Esta herramienta la posee el LabVIEW y permite reunir todos los sub-programas de una manera ordenada.

### **III.5 Validar la herramienta desarrollada con el programa de simulación de procesos comercial.**

Una vez modelada y simulada la planta seleccionada en el primer objetivo en un simulador de procesos y la simulación realizada en este Trabajo Especial de Grado, se procedió a comparar los resultados que arrojaron ambas simulaciones, con la finalidad de validar y apreciar que tan preciso son los modelos desarrollados con esta herramienta.

Previamente, para facilitar la programación y garantizar el funcionamiento correcto de los módulos desarrollados, se realizaron validaciones individuales; es decir, cada sub-programa que define un equipo en específico se verificó individualmente.

Posteriormente, ya construido todo el proceso, se procedió a verificar y validar ejecutando paralelamente las dos simulaciones, tanto la realizada en este trabajo como la desarrollada en el simulador comercial.

Para validar el caso de estado dinámico, se realizan perturbaciones iguales en la presión de entrada y salida de la planta, y mediante tablas se aprecian los resultados que serán mostrados en el siguiente capítulo.

### **III.6 Desarrollo de una interfaz amigable para los usuarios.**

En este Trabajo Especial de Grado se desarrolló una interfaz que es de fácil entendimiento para cualquier persona relacionada con procesos químicos o afines. Donde el estudiante, profesor y/o profesional puede manipular diversas variables y ver el comportamiento de la planta en un determinado tiempo (tiempo real o acelerado), para ello se desarrolló el programa siguiendo la estructura genérica de un simulador y se usaron las herramientas que dispone el LabVIEW para la parte de interfaz, se agregaron botones, pestañas, ventanas con tablas, gráficas y dibujos del proceso simulado.

Para facilitar la programación de la herramienta a desarrollar, se usará a MatLab como resolvidor de ecuaciones (solver) y la conexión entre programas es realizada a través de nodos (Scripts), estos permiten realizar los modelos matemáticos que calculan propiedades en corrientes o equipos de una manera rápida y eficaz, así como también se pueden crear unos módulos (subprogramas) donde cada uno represente una operación unitaria, y en un futuro teniendo el programa LabVIEW se podrá simular cualquier planta o proceso.

### **III.7 Desarrollar un manual de usuario**

Siendo aún la herramienta desarrollada muy parecida a un simulador comercial como etapa final de este Trabajo Especial de Grado se elaboró un manual de operación que sirve como guía a los distintos usuarios y permitirá entender de manera básica como trabajar con la herramienta de simulación desarrollada. De manera general el manual contendrá una descripción del ambiente de trabajo, así como también de las utilidades y funciones que posee cada programa desarrollado. Siendo muy práctico tanto para el usuario como para futuros desarrolladores del programa.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se presentan los resultados que se obtuvieron de la investigación y sus respectivos análisis, siguiendo la metodología planteada.

#### IV.1 Seleccionar una planta como caso base cuya configuración y equipos hayan sido simulada utilizando un simulador de procesos.

En la Figura.- 7, se aprecia la unidad de destilación extraída del tutorial de UNISIM Design que se seleccionó como simulación guía para realizar la herramienta.

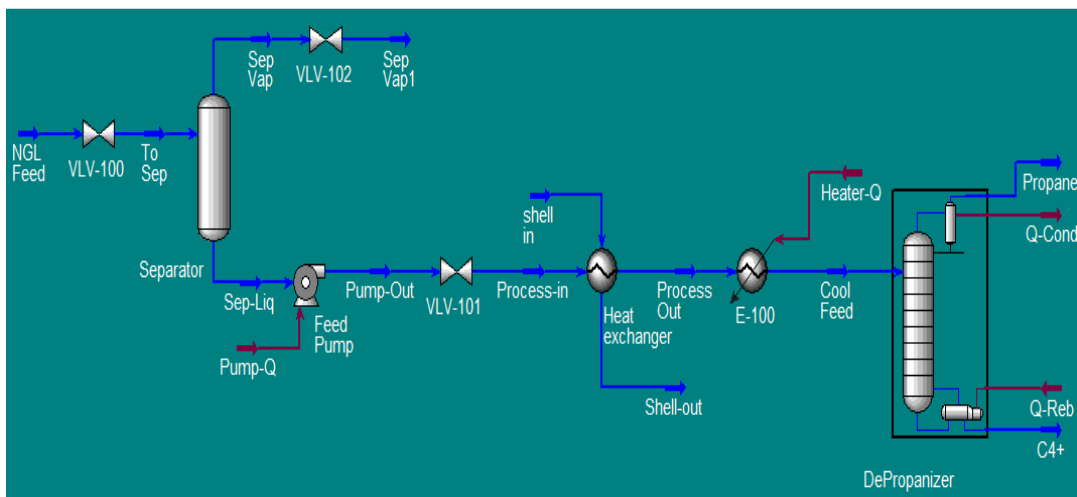


Figura.- 7 Planta de destilación seleccionada, perteneciente a un corte ligero de crudo, (Honeywell, 2008)

Como se puede observar en la Figura.- 7, se tiene un proceso de destilación de una mezcla de hidrocarburos livianos tales como etano, propano, butanos pentanos y hexano. También, se aprecia que el proceso está constituido por tres válvulas, un flash, una bomba, dos intercambiadores y una columna de destilación.

El proceso se seleccionó ya que cumple con las expectativas y con el objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado, porque de esta manera se posee la información necesaria para comparar y validar la simulación que se realiza. Además, se considera que tanto el simulador como el Manual de UNISIM Design poseen una gran confiabilidad, ya que es una herramienta conocida y usada a nivel mundial.

En el manual inicialmente hay que especificar los componentes y el modelo termodinámico que se utiliza. Posteriormente, en una pantalla, se construye el diagrama de flujo (DFP) de la planta, mediante módulos (objetos) que se arrastran desde una paleta hacia la pantalla principal, para luego a cada corriente y equipo asignarle las especificaciones (grados de libertad) necesarias para que puedan ejecutarse correctamente.

A continuación, se muestra en la Tabla N° 4 la serie de especificaciones que menciona el manual que debe asignarse a las corrientes de entrada (entrada principal y en el intercambiador de calor) y en el anexo se aprecian las tablas, con las especificaciones de los equipos (válvulas, bomba, intercambiadores y columna) que posee el proceso.

Tabla N° 4 Especificaciones que le asigna el manual de UNISIM Design a las dos corrientes de entradas.

Nombre de Corrientes	NGL Feed	Shell-in
Temperatura (C)	15	432,3
Presión (KPa)	380	1170
Flujo Molar (Kgmol/h)	1898	437
Comp. Molar (etano)	0,01	-----
Comp. Molar (propano)	0,43	-----
Comp. Molar (i-butano)	0,07	-----
Comp. Molar (n-butano)	0,12	0,03
Comp. Molar (i-pentano)	0,05	0,11
Comp. Molar (n-pentano)	0,04	0,11
Comp. Molar (n-hexano)	0,28	0,75

Se puede apreciar en la Tabla N° 4 que se especifican y cubren los grados de libertad de la corriente (C+2) ya que se establece la composición y tres variables más. En caso de no estar definida completamente, el programa no realiza los cálculos o presenta una alerta mencionando que le faltan datos. Una vez realizado el diagrama de flujo en el simulador y dado las especificaciones de cada corriente y equipo, se puede ejecutar la simulación para apreciar los diferentes resultados según sean requeridos por el usuario.

**IV.2 Realizar un análisis de grados de libertad del proceso de destilación a simular.**

Como resultado de este Trabajo Especial de Grado en la Tabla N° 5 se aprecian las especificaciones que necesita dar el usuario en el programa que se desarrolló, para cubrir los grados de libertad que requieren los equipos del proceso simulado, Dichas especificaciones se encuentran rígidas ya que se programaron de esa manera; en los simuladores comerciales estas especificaciones pueden variar, pero igualmente deben cubrir los grados de libertad necesarios para que el equipo se ejecute sin problemas.

Tabla N° 5 Especificaciones necesarias para cubrir los grados de libertad de las operaciones unitarias que se encuentran en la planta simulada.

Esquema	Nombre de la Unidad	Corrientes de entrada (especificada)	Especificaciones	Grados de Libertad
	Válvula	(C+2)	$\Delta P = 1$	(C+3)
	Flash	(C+2)	$\Delta P = 1$ , $Q = 1$	(C+4)
	Bomba	(C+2)	$\Delta P = 1$ , $\eta = 1$	(C+4)
	Intercambiador Tubo y carcasa	2 (C+2)	$\Delta P = 2$ , $UA = 1$	$2(C+7)$
	Ebullidor Total Condensador Total	(C+2)	$\Delta P = 1$ , $Q = 1$	(C+4)
	Columna de destilación	(C+2) +	Pres. de corriente que sale de cada etapa: N Pres. salida condensador: 1 Calor en cada etapa: N-1 Numero de etapas: 1 Numero etapas por debajo alimentacion: 1 Destilado: 1 Razón de reflujo: 1	$(C+2N+6)$

Para el estudio de grados de libertad en dinámico, como se mencionó en la metodología, que en el caso de los equipos acumuladores de presión (flash, tanques, etc), poseen una corriente más debido a la propia acumulación y se toma en cuenta como una corriente de reciclo, pero esta será ficticia y no existe en el proceso, simplemente sera una “corriente” que arrastre la propiedades termodinamicas y fisico químicas de la mezcla que se encuentra acumulada en el equipo, que no necesariamente seran igual a las corrientes de entrada u salida.

**IV.3 Construir una base de datos de hidrocarburos que pueda ser utilizada por la herramienta a desarrollar.**

Para que el programa desarrollado pueda ejecutarse y no generar errores de cálculos, se necesita conocer las propiedades físico químicas no dependientes de la temperatura y los coeficientes de las correlaciones para las propiedades dependientes de la temperatura. Estas propiedades y coeficientes se encuentran en una base de datos que las contiene.

Esta base de datos se realiza en Microsoft Access como se muestra en la siguiente figura.

Componente	PM_g/mol	PVAnt_A	PVAnt_B	PVAnt_C	PVAnt_D	PVAnt_E	PVAnt_F	Prc_KPa	Tc_C	Voic_m3/kgmol	Cl
Etano	30,07	44,0103	-2568,82	0	-4,97635	0,0000146447	2	4883,85009765	32,2780090332	0,148000001907349	-1,
Propano	44,1	52,3785	-3490,55	0	-6,10875	0,0000111869	2	4256,66015625	96,7480102539	0,200000002980232	39
I-butano	58,12	58,7845	-4136,68	0	-7,01666	0,0000103662	2	3647,62011718	134,946008300	0,263000011444092	30
N-butano	58,12	66,945	-4604,09	0	-8,25491	0,0000115706	2	3796,62011718	152,049005126	0,254990011453629	67
I-pentano	72,15	66,7563	-5059,18	0	-8,08935	0,00000925395	2	3333,59008789	187,248010253	0,30799001455307	64
N-pentano	72,15	63,3315	-5117,78	0	-7,48305	0,00000776606	2	3375,12011718	196,450006103	0,310990005731583	63
Hexano	86,18	70,4265	-6055,6	0	-8,37865	0,00000661666	2	3031,62011718	234,748010253	0,368000000715256	74

Figura.- 8 Base de datos realizada en Microsoft Access con las propiedades físico-químicas de los componentes.

#### IV.4 Programar los modelos del proceso de destilación en estado estacionario y no estacionario.

En la Figura.- 9 se aprecia un esquema general sobre cómo se desarrolla el programa que representa el proceso de destilación.



Figura.- 9 Esquema general del desarrollo del programa para el proceso de destilación.

Para el desarrollo del programa, tal como muestra la Figura.- 9 y siguiendo el esquema planteado en el (Scenna, 1999), se comenzó generando una serie de programas que calculan diversas propiedades termodinámicas y físico-químicas para un componente determinado, para luego programar y construir una interfaz que tiene la capacidad de mostrar las propiedades termodinámicas y físicas para una determinada condición de presión y temperatura de una mezcla. Esta interfaz se llamará módulo corriente, que se explicará posteriormente.

Luego, se realizó la programación y modelado de los equipos para entrelazarlos mediante módulos corrientes y finalmente simular el proceso seleccionado en el primer objetivo. En las próximas secciones del trabajo, se describe con mayor detalle cómo se modelaron, desarrollaron y programaron los distintos módulos.

##### IV.-4.1 Programación de los módulos de propiedades.

Para el desarrollo del trabajo, se requieren conocer las propiedades termodinámicas y fisicoquímicas de los componentes, sea en su estado puro o en mezclas. Es por ello que en las siguientes secciones se detalla cómo se determinan y programan las propiedades que se calculan en este programa.

Todas las propiedades termodinámicas calculadas fueron realizadas siguiendo la formulación Gamma/Phi, considerando el modelo de termodinámico ideal donde Gamma y Phi tienen como valor igual a 1, esto es posible ya que la mezcla de

hidrocarburos con las que se realiza la simulación se considera ideal ya que son de la misma especie.

**Presión de Vapor.**

Para calcular la presión de vapor de los componentes, se utiliza la ecuación de Antoine que utiliza el Manual de UNISIM Design, cuya ecuación es dependiente de la temperatura. Se presenta a continuación.

$$\ln(P^{vap}) = A_i + \frac{B_i}{(T+C_i)} + D_i * \ln(T) + E_i * T^{F_i} \tag{2}$$

Donde:

T= Temperatura del sistema (K).

Ai = Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

Bi = Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

Ci = Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

Di= Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

Ei= Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

Fi= Parámetros de la ecuación de Antoine para el componente i (Adim).

P<sup>vap</sup>= Presión de Vapor (KPa).

Conocida la ecuación tuvo que colocar en un VI un módulo cuyas entradas son las constantes de Antoine y la temperatura del sistema, como se muestra en la figura10.

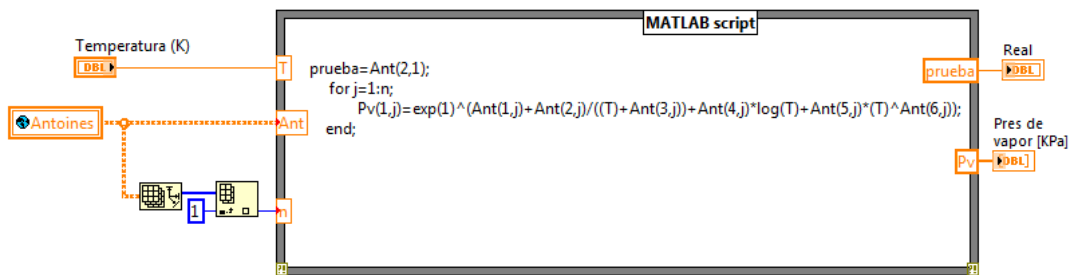


Figura.- 10 Diagrama de bloque que estima la presión de vapor.



**Temperatura de burbuja**

Para desarrollar el módulo cálculo de la temperatura de burbuja, se siguió la metodología mencionada en (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007), siguiendo la formulación Gamma ( $\gamma$ ) /Phi( $\phi$ ) que incluye el coeficiente de actividad para explicar las no idealidades de la fase líquida, expresado bajo la siguiente ecuación

$$y_i \phi_i P = x_i \gamma_i P_i^{Vap} \tag{3}$$

Donde

$y_i$ = Composición del vapor de componente i

$x_i$ = Composición del líquido de componente i

$\gamma_i$ = Correlación para el coeficiente de actividad (gamma)

$\phi_i$ = Correlación para el coeficiente de actividad (phi)

P=Presión del sistema (KPa).

Como ( $\gamma$ ) y ( $\phi$ ) poseen un valor de uno considerando la idealidad del método termodinámico y siguiendo el esquema mostrado en la Figura.- 11 se procede a calcular la temperatura de burbuja.

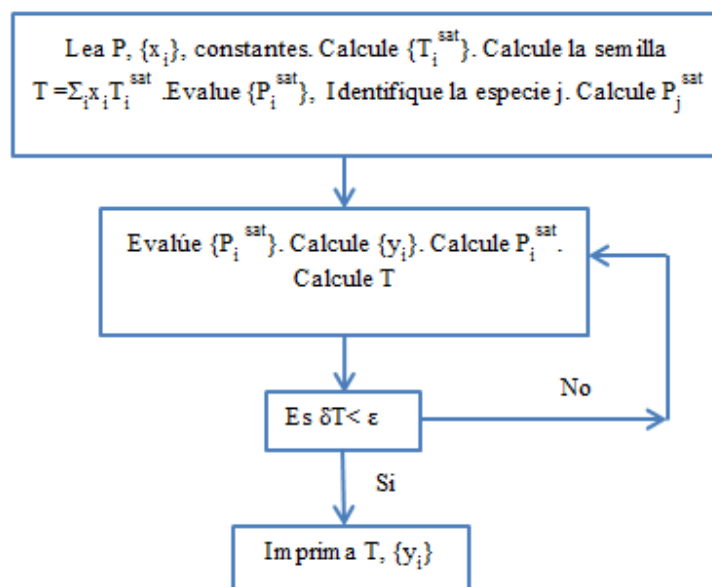


Figura.- 11 Diagrama de bloques para el cálculo de la temperatura de burbuja (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007).

Inicialmente se debe conocer la presión y la composición del líquido de entrada, luego se procede a calcular la temperatura de saturación de cada componente, despejándola usando la ecuación de Antoine modificada (3) con un método numérico del MatLab. Posteriormente se estima una temperatura semilla con la siguiente ecuación:

$$T_{semilla} = \sum x_i * T_i^{sat} \quad (4)$$

Donde:

$T_{semilla}$  = Temperatura estimada (K)

$T_i^{sat}$  = Temperatura de vapor de cada componente i (K)

Ahora se comienza a realizar un proceso iterativo donde se calcula la presión de saturación de cada componente, utilizando la ecuación (3) pero con la temperatura semilla, de estas presiones calculadas se identifica una **especie j**. La cual será aquella que posea la mayor composición en la mezcla. Y utilizando la siguiente ecuación se calcula una presión de saturación del sistema.

$$P_j^{sat} = \frac{P}{\sum x_i \frac{P_i^{sat}}{P_j^{sat}}} \quad (5)$$

Donde:

$P_j^{sat}$  = Presión de saturación del componente seleccionado como especie j (KPa).

$P_i^{sat}$  = Presión de saturación del componente i (KPa).

Ahora se estima una nueva temperatura usando la ecuación (3) pero con la presión  $P_j^{sat}$ , con esta presión y la composición de líquido se calcula la composición del gas (y), usando la siguiente ecuación.

$$y_i = \frac{x_i * P_i^{sat}}{P} \quad (6)$$

El proceso de cálculo se repite iterativamente hasta que la diferencia de temperatura calculada con la anterior sea menor a determinado error establecido (por defecto en 0,0001.). Obteniendo como resultado final la temperatura de burbuja a la Presión y

temperatura dada, como resultado adicional, también se calcula la máxima composición de la burbuja que se encuentra en equilibrio con el líquido.

Conocido el proceso, se programó en un script de Matlab en LabVIEW la secuencia de cálculo que permite conocer la temperatura de burbuja, tal como lo muestra la figura 32, en la sección de anexo, donde se aprecia que requiere conocer la presión del sistema, las constantes de Antoine y temperaturas críticas de cada componente

**Temperatura de rocío.**

Para desarrollar el módulo cálculo de la temperatura de rocío, se siguió la metodología mencionada en (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007), análoga a la temperatura de burbuja. Siguiendo el esquema mostrado en la Figura.- 12 df

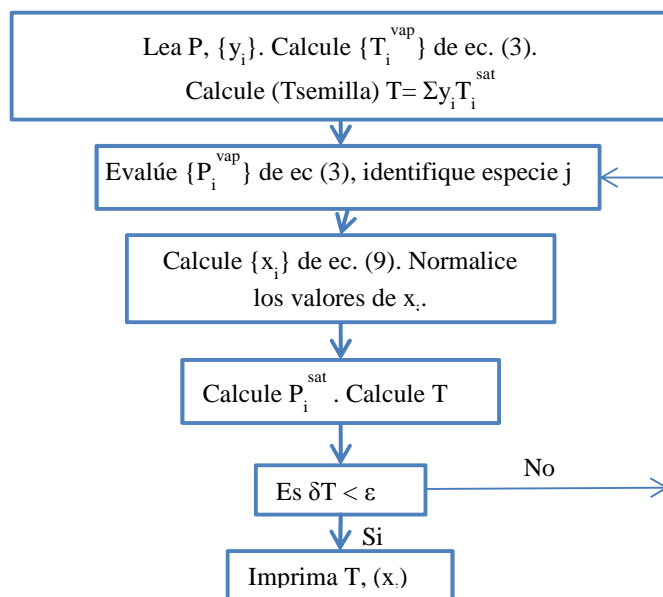


Figura.- 12 Diagrama de bloques para el cálculo de la temperatura de rocío (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007).

Como se aprecia en la figura 12 se posee una secuencia similar a la desarrollada en el módulo de temperatura de burbuja, solo difiere en que ahora es especificada la presión y la composición del gas, y que la ecuación que se utiliza para calcular la presión del componente j es la siguiente:

$$P_j^{sat} = P * \sum y_i * \frac{P_i^{sat}}{P_i^{sat}} \tag{7}$$

Y para calcular la composición de líquido se utiliza.

$$x_i = \frac{y_i * P}{P_i^{sat}} \tag{8}$$

De manera análoga a la temperatura de burbuja se tuvo que programar en un Matlab script de LabVIEW un VI que calcule la temperatura de rocío, en el anexo en la figura 33 se puede apreciar la programación realizada en el LabView.

**Presión de burbuja y rocío**

Para desarrollar el módulo que realiza el cálculo de presión y temperatura de burbuja y rocío, se siguió los algoritmos que se mencionan en (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007). Este se observa en la Figura.- 13.

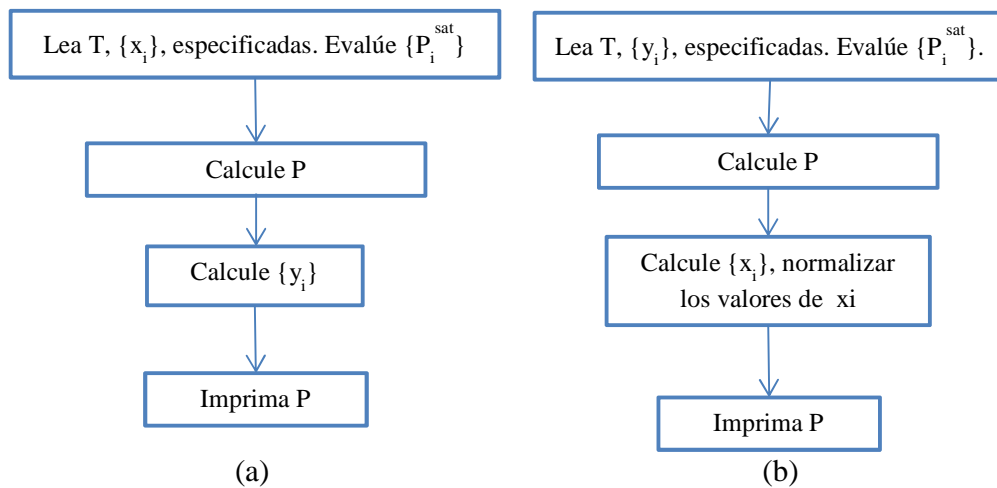


Figura.- 13 Algoritmos que representa el esquema de cálculo para calcular (a) Presión de burbuja (b) presión de rocío

Como muestra la Figura.- 13, se debe conocer la temperatura y composición de la mezcla. Luego, se calcula mediante la ecuación (3) la presión de vapor de cada componente y mediante las ecuaciones siguientes se calculan las presiones estimadas.

$$P = \sum x_i * P_i^{vap} \quad (\text{Presión de burbuja}) \tag{9}$$

$$P = \frac{1}{\sum y_i/P_i^{vap}} \quad (\text{Presión de rocío}) \quad (10)$$

Calculadas las presiones, se proceden a conocer la composición del gas (burbuja) o del líquido (rocío), y en el caso del líquido, las composiciones deben ser normalizadas antes de entregarlas.

La programación que resulta de seguir estos algoritmos de resolución para estos módulos se encuentra en la sección de anexos (ver figura 34 y figura 35).

### **Constante de equilibrio (Ki).**

Para el cálculo de la constante de equilibrio (Ki), se utiliza la formulación del gamma/phi, donde a la Ley de Rault modificada que incluye el coeficiente de actividad (ver ecuación 4) (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007). Se conoce como la tendencia de una especie química a repartirse entre la fase de líquido y vapor a la relación de equilibrio (Ki) que se encuentra definida como:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{y_i P_i^{vap}}{P \phi_i} \quad (11)$$

Donde:

Ki=Constante de equilibrio.

### **Fracción de vapor (Fi).**

Es un parámetro indicador para conocer si una mezcla multicomponente producirá o no una mezcla de dos fases en equilibrio cuando se somete a una operación de flash a una temperatura y presión dadas. Estará comprendido entre los valores cero y uno.

Si  $\phi$  se encuentra entre el valor 0 y 1, se encuentra en equilibrio de fases; si  $\phi$  es igual a 0, se dice que se encuentra en líquido saturado o sub enfriado. Mientras que si  $\phi$  es igual a la unidad se encuentra en vapor saturado o sobre calentado.

Para calcular el valor de  $\phi$ , se utiliza la el método de Newton's Rapshon mencionado en el (Henley & Seader, 2000), donde conocida la constante de equilibrio (Ki) y composición global de la mezcla (Zi) se busca la raíz de la siguiente función.

$$f(\varphi) = \sum \frac{Z_i \cdot (1 - K_i)}{(K_i \cdot \varphi^k + (1 - \varphi))} \quad (12)$$

Donde:

$Z_i$  = composición global de la mezcla.

$\varphi^k$  = valor inicial o anteriormente calculado del valor de  $f_i$ .

En el anexo se encuentra la programación realizada para este módulo (ver figura 36)

**Composición de líquido y/o gas en una mezcla (“x” e “y”).**

Para desarrollar el módulo que calcula la composición de vapor y/o líquido en una mezcla se debe conocer la fracción de vapor, la constante de equilibrio y la composición global de la mezcla ( $z_i$ ).

Y con las siguientes ecuaciones, se proceden a calcular las composiciones de líquido y/o gas. (Henley & Seader, 2000)

$$x_i = \frac{z_i}{1 + \varphi(K_i - 1)} \quad (13)$$

$$y_i = \frac{z_i \cdot K_i}{1 + \varphi(K_i - 1)} = x_i \cdot k_i \quad (14)$$

**Entalpía y Entropía**

Para desarrollar los módulos que calculan la entalpía y entropía en una mezcla se procede a seguir el camino planteado en (Henley & Seader, 2000) apreciado en la Figura.- 14 que presenta la siguiente trayectoria.

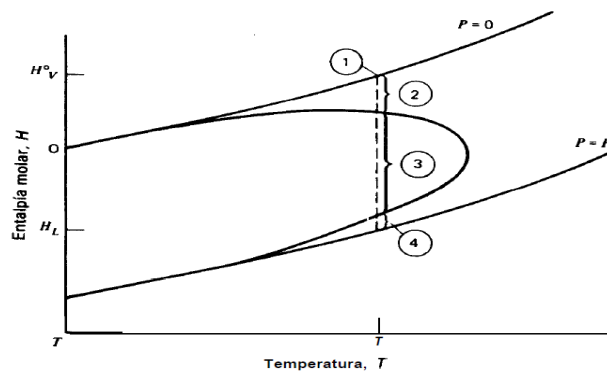


Figura.- 14 Trayectoria para el cálculo de entalpía de un líquido. (Henley & Seader, 2000)

Inicialmente, se fijó como estado de referencia que la entalpía de un elemento puro es cero en condiciones de 25 °C y 1KPa, y para formar un compuesto a estas condiciones se requiere una cantidad de energía, esta será su entalpía de formación y se considera como un gas ideal. Posteriormente se le suma el cambio entálpico del estado de referencia hasta la temperatura del sistema (Punto 1), obteniendo así la entalpía de gas ideal para cada compuesto. Si se sigue la trayectoria, al punto “3” se le suma la entalpía de condensación; es decir, la entalpía que necesita el gas ideal para convertirse en solución ideal y luego existe una corrección de la entalpía debido a la corrección por presión (Punto 4). Para obtener la entalpía de la mezcla se utilizan la siguientes ecuaciones según su fase (líquido o vapor)

$$H^{gideal} = \sum H_i^{gideal} * y_i \quad (15)$$

$$H^l = \sum H_i^{solideal} * x_i \quad (16)$$

Donde:

$H^{gideal}$  = Entalpía de la mezcla ideal

$H_i^{gideal}$  = Entalpía de gas ideal

$H_i^{solideal}$  = Entalpía de solución ideal

La entropía fue desarrollada de manera análoga a la entalpía y siguiendo la misma trayectoria, donde inicialmente, se conoce la entropía de formación de los compuestos. Una vez que se conoce la entropía de formación se procede a sumarle el cambio entrópico del estado de referencia (25 °C y 1KPa) a la temperatura y presión del sistema (punto 1) obteniendo así la entropía de gas ideal, utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta S = \int_{T^0}^T C_p^{gi} \frac{dT}{T} - \ln(P/P^0) \quad (17)$$

Donde

$C_p^{gi}$  = Capacidad calorífica del componente.

$T^0$  = Temperatura de referencia (25 °C).

$P$  = Presión del sistema (KPa).

$P^0$  = Presión de referencia (1 KPa)

Teniendo esto se puede calcular la entropía de líquido ideal, agregándole la entropía de vaporización, que puede ser calculada ya que se conoce la temperatura normal de ebullición, la entalpía de vaporización y de referencia, y usando el método de Watson (Van Ness, Smith, & Abbott, 2007), se obtiene la entropía de vaporización. Esta entropía se le suma a la anterior, obteniendo así la entalpía de líquido ideal de un compuesto (punto 3) y por último se corrige por presión la entropía.

Finalmente para calcular la entropía de una mezcla líquida se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$S_i^{ideal} = \sum x_i S_i - R \sum x_i \ln(x_i) \quad (18)$$

Donde

$S_i^{ideal}$  = Entropía del compuesto i en solución ideal.

R = Constante de los gases.

En el anexo se encuentra la programación que se realizó para el cálculo de entalpía tanto en su fase gas como líquida (Ver figura 37 y figura 38).

### **Flujo de líquido o vapor en una mezcla.**

Para desarrollar este módulo, se requiere conocer el flujo molar y la fracción de vapor, luego aplicar las siguientes ecuaciones.

$$F_{vap} = F_z * \phi \quad (19)$$

$$F_{liq} = F_z - F_{vap} \quad (20)$$

Donde:

$F_{vap}$  = Flujo molar del vapor (KJ/h).

$F_{liq}$  = Flujo molar del líquido (KJ/h).



#### IV.-4.2 Programación de los módulos corrientes.

En la Figura.- 15 se observa un esquema que ilustra los tres modelos de los módulos que se programaron para las corrientes.

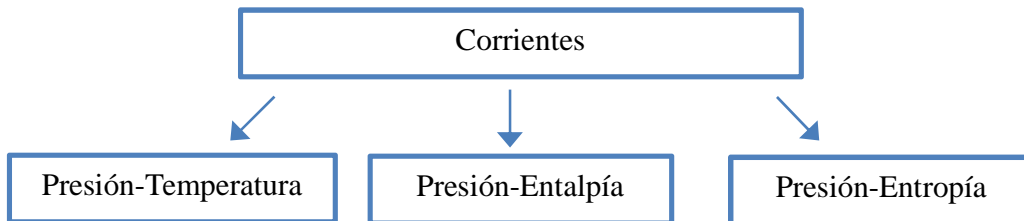


Figura.- 15 Esquema general de cómo se clasifica el módulo corriente.

En un simulador de procesos, los módulos más importantes y que tienen una gran relevancia y funcionabilidad en este, es el modulo corriente, ya que es capaz de mostrar a través de su interfaz todas las propiedades y características que tiene una corriente dentro del proceso.

Para definir la corriente y que ésta se ejecute, se requiere conocer la composición y tres especificaciones más. Entre ellas, el flujo másico o molar, la presión y una más, la cual puede ser temperatura, entalpía y entropía. De aquí la sub-clasificación estimada. (Scenna, 1999)

##### IV.-4.2.1 Programación del módulo corriente “presión-temperatura”.

Inicialmente, se procede a estimar la temperatura de rocío y de burbuja, las cuales se comparan con las especificadas por el usuario o en su defecto, es calculada previamente por un equipo aguas arriba. Esta comparación permite establecer en qué fase se encuentra la mezcla, para así realizar los cálculos respectivos de cada fase. Para ello, se clasificará la explicación según su fase (líquida, gaseosa o mezcla líquido-vapor).

*Fase líquida:* En el caso en que la temperatura especificada es menor a la de burbuja se considera que se encuentra en estado líquido. Por ende se supone lo siguiente:

- Que la mezcla de salida tiene la misma composición que la entrada.

- La fracción de vapor es cero.
- Las propiedades que especifican el vapor serán igual a cero.
- Las propiedades termodinámicas de la mezcla serán iguales a las propiedades de salida del líquido.

*Fase gaseosa:* En el caso en que la temperatura especificada es mayor a la de rocío se considera que se encuentra en vapor. Por lo que se supone lo siguiente:

- Que la mezcla de salida tiene la misma composición que la entrada.
- La fracción de vapor es igual a uno.
- Las propiedades termodinámicas y físico-químicas que especifican el líquido no se calcula y serán igual a cero.
- Las propiedades de la mezcla serán iguales a las propiedades de salida del vapor.

*Mezcla Líquido-Vapor:* En el caso en que la temperatura especificada es mayor a la de burbuja pero menor a la de rocío, se considera por defecto que se encuentra en estado una mezcla de líquido-vapor. Por ende se supone lo siguiente:

- Que la mezcla se encuentra perfectamente mezclada y en equilibrio.
- La fracción de vapor será calculada y se encuentra entre el valor de 0 y 1.
- Las propiedades termodinámicas y físico-químicas que especifican cada fase serán calculadas independientemente.
- La composición global de la mezcla será igual a la especificada o calculada a la entrada de la corriente, mientras que el resto de propiedades serán calculadas.

En la Figura.- 16, se muestra el diagrama de bloque donde se programó la secuencia de cálculos realizados, para hallar las propiedades de una mezcla que se encuentre en equilibrio de líquido vapor.

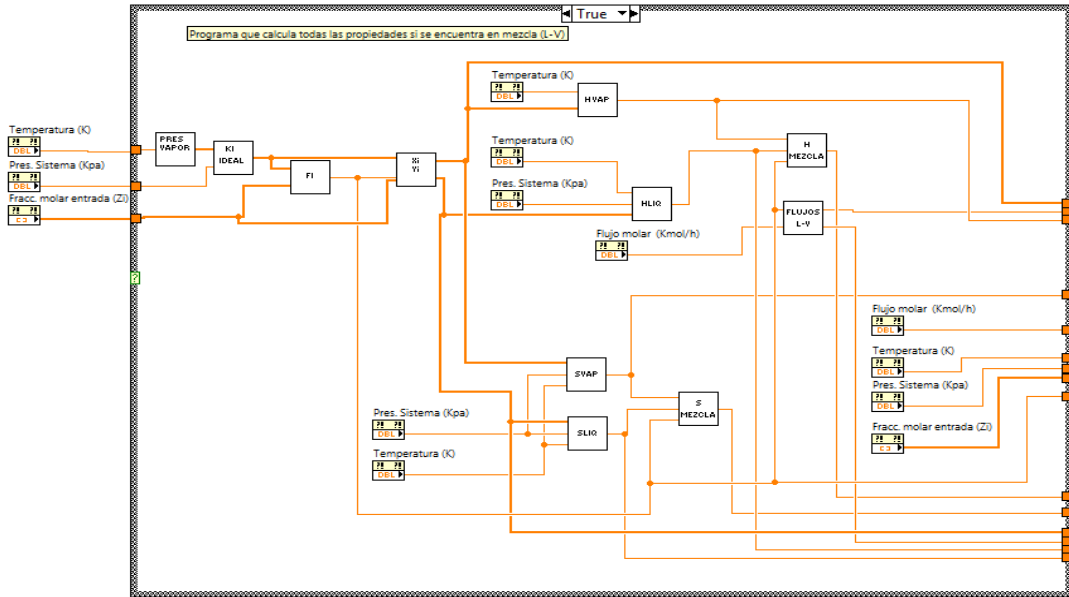


Figura.- 16 Diagrama de bloque con la secuencia de módulos que calculan las diversas propiedades.

En la Figura.- 16, el módulo desarrollado calcula el conjunto de propiedades termodinámicas de una mezcla líquido-vapor. Inicialmente se observa, que entran especificadas la fracción molar de la mezcla, temperatura, presión y el flujo de la mezcla. Con la temperatura, se procede a calcular la presión de vapor, que junto a la presión especificada se calcula la constante de equilibrio (usando como modelo termodinámico: ideal), luego se calcula la fracción de vapor de la mezcla. Conociendo esto se pueden calcular las composiciones que posee el líquido y vapor en equilibrio, para posteriormente poder calcular las propiedades termodinámicas (entalpía, entropía) referentes a cada fase; así como también el flujo que posee cada fase en la mezcla y así mostrar en la interfaz los valores de salida.

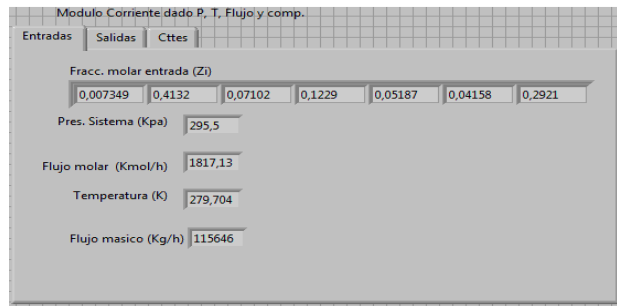


Figura.- 17 Interfaz para el módulo corriente presión temperatura

En la figura 17 se puede apreciar la interfaz desarrollada para el módulo presión temperatura, donde se pueden apreciar las entradas (grados de libertad) que requiere el módulo para poder ejecutarse, esta interfaz será replicada para los otros módulos corrientes, cambiando únicamente la variable temperatura por entalpía o entropía.

#### IV.-4.2.2 Programación del módulo corriente “presión-entalpía”.

Para programar este módulo de corriente, se realiza una secuencia de programación y cálculo análogo al desarrollado anteriormente, pero ahora se especifica la entalpía y se sigue la metodología que plantea el (Henley & Seader, 2000) para este caso.

Con la presión y fracción molar de la mezcla se calcula la temperatura de rocío y burbuja; una vez calculadas estas se procede a calcular las entalpías en ese punto, para posteriormente comparar con la entalpía de entrada y establecer en qué fase se encuentra la mezcla. Conociendo la fase en que se encuentra la mezcla, el flujo másico o molar, la composición, presión y entalpía se procede a calcular la temperatura. (Henley & Seader, 2000) Esta se calcula a partir del desarrollo del modelo matemático de Falsa posición cuya función a evaluar es:

$$f\{Tv\} = \frac{\phi H_v + (1-\phi)H_L - H_f}{1000} = 0 \quad (21)$$

Donde:

$\phi$  = fracción de vapor (adim).

$H_v$  = entalpía de vapor (KJ/Kgmol).

$H_L$  = entalpía de líquido (KJ/Kgmol).

$H_f$  = entalpía de la mezcla (KJ/Kgmol).

Por ende, para conocer la temperatura de la corriente, se realiza un ciclo iterativo que resuelve el modelo matemático de falsa posición, donde en cada iteración también se calculan las entalpías (con la nueva temperatura estimada) de vapor y/o líquido según sea el caso, hasta que el programa converja a un error determinado. En el anexo (Ver figura 39) se puede apreciar la programación del modelo y como fue aplicado el modelo matemático. Una vez que calculada la temperatura, se puede determinar el resto de propiedades termodinámicas y fisicoquímicas que posee la corriente.

#### IV.-4.2.3 Programación del módulo corriente presión entropía.

Para el desarrollo y programación de este equipo, se estructuró y realizó de manera análoga al módulo anterior. Pero en vez de especificar la entalpía se especifica la entropía. Y se resuelve de igual manera la siguiente ecuación:

$$\text{—————} = 0 \quad (22)$$

Donde:

$\phi$  = fracción de vapor (adim).

$S_v$  = entropía de vapor (KJ/Kg $\cdot$ mol $\cdot$ C).

$S_L$  = entropía de líquido (KJ/Kg $\cdot$ mol $\cdot$ C).

$S_f$  = entropía de la mezcla (KJ/Kg $\cdot$ mol $\cdot$ C).

#### IV.-4.3 Programación de los módulos de los equipos que simulan el proceso.

En la Figura.- 18, se detallan los módulos programados y desarrollados para los diferentes equipos, necesarios para simular la planta de destilación seleccionada en el primer objetivo.

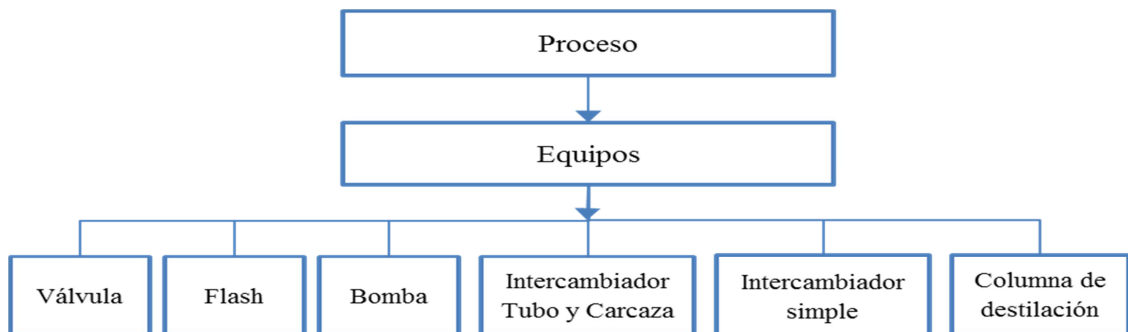


Figura.- 18 Esquema general de los equipos que conforman el proceso.

Como se observa en la Figura.- 18, se ilustra un esquema que muestra los diferentes módulos programados, referentes a los equipos que fueron necesarios para desarrollar la planta de destilación. En las siguientes secciones se detallará como fue modelado y programado cada uno de ellos.

Todos los equipos fueron desarrollados y programados de manera sencilla a excepción de la columna de destilación que siguió una metodología que fue estudiada y desarrollada por (Azancot, 2010) en su trabajo de tesis.

Para la programación y modelado de los equipos, es necesario conocer las distintas ecuaciones que los rigen (balance masa, energía, etc) y las especificaciones que lo diseñan (Altura, diámetro, altura de boquilla, entre otros)

Aparte, se considera que a los equipos le entran todas las características y propiedades específicas del fluido y los equipos entregan como resultados cuatro especificaciones (Grados de libertad) para el módulo siguiente que son corrientes.

#### IV.-4.3.1 Válvulas

En la Figura 17 se puede observar la interfaz desarrollada en la herramienta para el modulo válvula, donde las casillas en blanco pueden ser modificados por el usuario y las casillas grises son las que calcula el programa.

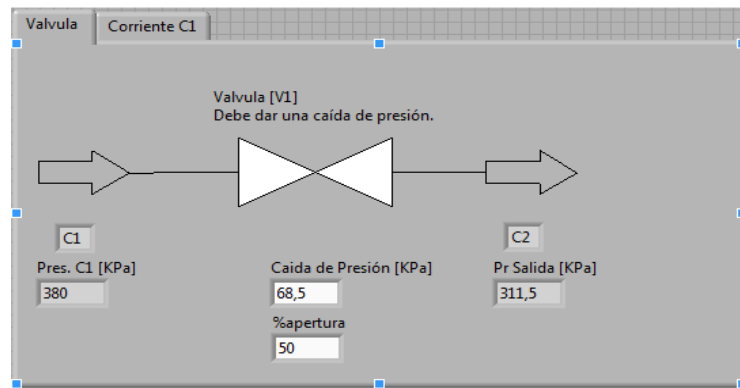


Figura.- 19 Interfaz de la válvula en el programa desarrollado

La ecuación general que rige una válvula proviene de la ecuación de Bernoulli, detallada en el apéndice A. Para desarrollar y programar el módulo válvula, se deben conocer los grados de libertad de la misma:

- El flujo, presión, temperatura y la composición de la mezcla de entrada: (C+2).
- Una especificación, que es la caída de presión (1 Especificación).

En estado estacionario al realizar los balances de masa y de energía respectivos del equipo, se establece que:

- El flujo y composición de entrada es igual a la salida.
- La entropía de entrada es igual a la de salida
- La presión de salida será igual a:  $P_{\text{salida}} = P_{\text{entrada}} - \Delta P$ .

Para el caso dinámico se usa la ecuación de diseño de la válvula que proviene de la ecuación del Bernoulli.

#### IV.-4.3.2 Flash

En el flash se lleva a cabo un proceso de separación en donde sólo se tiene una etapa de equilibrio, obteniendo así dos fases (líquido y vapor). Para desarrollar el módulo y programación de un flash, se deben conocer las siguientes especificaciones de operación (grados de libertad):

- Las características y propiedades del fluido de entrada (C+2).
- La presión y temperatura de operación (2 especificaciones).

También se supone lo siguiente:

- En el flash el líquido se encuentra en equilibrio con su fase de vapor, es decir que la presión y la temperatura serán la misma en toda la etapa.
- El líquido que se encuentra dentro del tanque, se encuentra perfectamente mezclado.
- Las composiciones y los flujos de líquido y vapor, que resultan del cálculo de equilibrio son iguales en la salida.

Resolviendo los balances de masa, energía y aplicando el método de Rachford-Rice para el cálculo de un flash. (Henley & Seader, 2000), se obtiene que:

- El equilibrio define la cantidad de mezcla que se evapora de la sustancia.
- A través del balance de energía se obtiene la temperatura de operación del flash.
- La composición de líquido y vapor del equilibrio.

En la figura 20 se muestra la interfaz desarrollada para el módulo flash, donde se aprecian las distintas pestañas, donde se pueden apreciar las características de entrada “Corriente C2” y se puede especificar diversas variables del flash (altura, diámetro, caída de presión, etc) en “Propiedades Flash”.

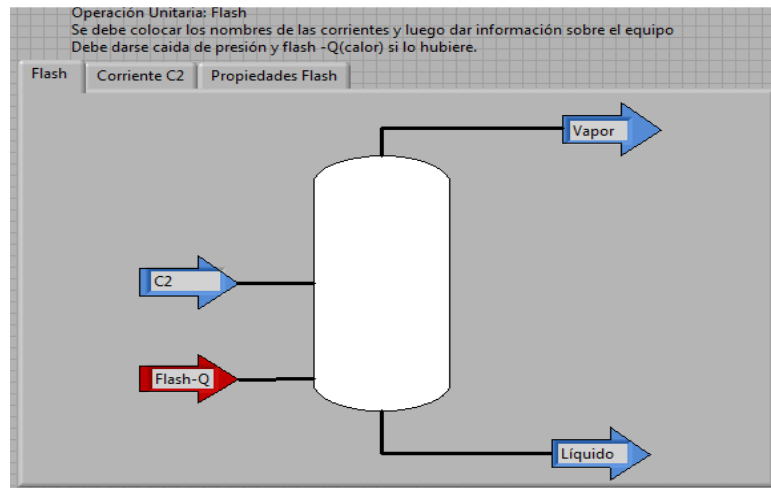


Figura.- 20 Interfaz desarrollada para el módulo flash.

En la sección de anexos se encuentra la programación realizada para el modulo flash (Ver figura 42).

#### IV.-4.3.3 Bomba

Una bomba es un equipo que se emplea para transportar fluidos desde una posición a otra, agregándole energía al fluido generando así el flujo del fluido. (Perry, 2001). En la figura 21 se muestra la interfaz realizada para el modulo bomba, donde el usuario debe colocar el aumento de presión y la eficiencia de la bomba para que se ejecute y estime el resto de propiedades.

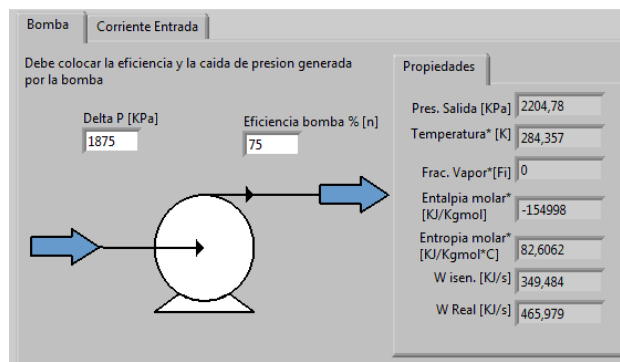


Figura.- 21 Interfaz realizada para el modulo bomba



Para programar el módulo que calcula propiedades y características de la bomba se debe especificar los siguientes grados de libertad:

- Las características y propiedades del fluido de entrada (C+2).
- La presión que ella es capaz de generar a un fluido ( $\Delta P$ ) (1<sup>era</sup> Especificación).
- La eficiencia (2<sup>da</sup> Especificación).

Conocidas las especificaciones y considerando las suposiciones, se modela la bomba siguiendo la trayectoria isentrópica donde, conocida la presión, entropía, composición y flujo de la mezcla de entrada, se calcula la entalpía de salida “isentrópica”.

Conocida esta y la entalpía de entrada, se procede a calcular el trabajo isentrópico de la bomba mediante la siguiente ecuación.

$$W_{isen} = h_{ise} - h_e \quad (23)$$

Donde

$W_{isen}$  = Trabajo isentrópico de la bomba (KJ/s).

$h_{ise}$  = entalpía de salida isentrópica (KJ/Kgmol).

$h_e$  = entalpía de entrada a la bomba (KJ/Kgmol).

Con el trabajo isentrópico y la eficiencia de la bomba se procede a calcular el trabajo real de la bomba mediante la siguiente ecuación:

$$W_{real} = \frac{W_{isen}}{\eta} \quad (24)$$

Donde:

$W_{real}$  = Trabajo real producido por la bomba (KJ/s).

$\eta$  = eficiencia de la bomba (%)

Ahora conocido el trabajo real se procede a calcular la entalpía de salida real. Para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

$$h_s = h_e - W_{real} \quad (25)$$

donde:

$h_s$  = entalpía real de salida (KJ/Kgmol).

Una vez calculada la entalpía real, ya se tienen todas las especificaciones (entalpía, flujo, composición y presión de descarga) necesarias, que son las que especifican el siguiente módulo (una corriente) y permite que se ejecute sin problemas.

La programación realizada en el bloque de diagramas del LabVIEW se encuentra en los anexos (Ver figura 40).

#### IV.-4.3.4 Intercambiador simple

Para modelar un intercambiador de simple que posee una corriente de fluido de entrada, una de salida y una corriente de energía, se deben suponer los siguientes grados de libertad:

- Las características y propiedades del fluido de entrada.(C+2)
- El flujo de calor y caída de presión. (2 Especificaciones)

Conocido esto se procede a realizar un balance masa y energía en el equipo y se define lo siguiente:

- El flujo y composición de entrada es igual al de salida.

Realizando el balance de energía se obtiene:

$$H_s = H_e + Q/F_z \quad (26)$$

Donde:

$H_s$ =entalpía de salida (KJ/Kgmol)

$H_e$ =entalpía de entrada (KJ/Kgmol)

$F_z$ =Flujo molar (Kgmol/h)

$Q$ =Cantidad de energía suministrada por el usuario (KJ/h)

Una vez calculada la entalpía, se tienen todos los grados de libertad para el siguiente módulo, que es una corriente “presión entalpía” donde se calcula el resto de propiedades.

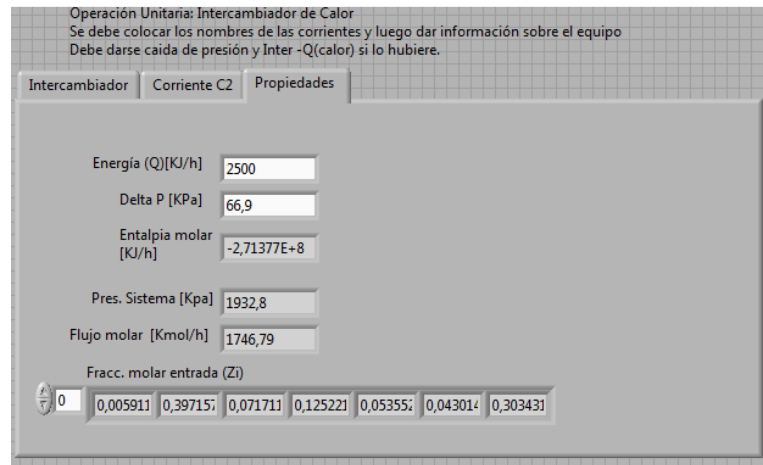


Figura.- 22 Interfaz del intercambiador de calor sencillo.

En la figura 22 se aprecia la interfaz que se realizó para el módulo de intercambiador simple donde el usuario puede apreciar diversas pestañas y debe colocar caída de presión y la energía que transfiere dicho equipo al fluido. En el anexo se encuentra la programación realizada en el bloque de diagramas (Ver figura 41).

#### IV.-4.3.5 Intercambiador de tubos y carcasa.

Para empezar el cálculo del módulo “intercambiador tubo-carcasa”, se deben conocer todas las características y propiedades (grados de libertad) de las corrientes de entrada y las especificaciones del equipo.

- Las características y propiedades del fluido de entrada (C+2).
- Las caídas de presión, tanto del tubo como la carcasa (2 especificaciones).
- Se especifica el coeficiente global de transferencia de calor por el área (UA). (1 especificación)

Realizando los respectivos balances de masa y de energía para el intercambiador de calor se establece que:

- Los flujos y las composiciones de las entradas son iguales a la entrada y salida de cada corriente.
- El calor que entrega cada corriente es igual (despreciando perdidas de calor al ambiente), y se rige por la ecuación:

$$Q_{ci} = m * \Delta H \quad (27)$$

Donde

$Q_{ci}$ = Calor de la corriente fría o caliente.

$m$ =Flujo másico (Kg/h).

$\Delta H$ = Cambio entálpico de la entrada con la salida.

Se tiene la ecuación de diseño de intercambiador.

$$Q = UA * \Delta T_{log} \quad (28)$$

Donde

$UA$ = Coeficiente de transferencia de calor por área (KJ/C\*s).

$\Delta T_{mlog}$ = Cambio medio logarítmico de la temperatura.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se procede a desarrollar el módulo “intercambiador tubo carcasa” que se modeló, se sigue una secuencia de cálculo que se encuentra en el (Incropera, 2005). Donde inicialmente se determina la máxima transferencia de calor posible ( $q_{max}$ ), esto comparando ambas corrientes. Luego, dependiendo de la comparación se procede a calcular una relación de transferencia ( $Cr$ ). Posteriormente, se calcula el NUT y con ambos valores se determina una eficiencia de transferencia ( $\epsilon$ ) y con éstos se estima el primer valor del calor.

Luego, se comienza un ciclo iterativo con el valor estimado del calor transferido ( $Q$ ), las entalpías de entrada y los flujos de las corrientes. Seguidamente, se estiman los valores de entalpías de salidas, uno para el fluido caliente y otro para el fluido frío. Con estos valores, y usando el modelo de corriente “presión entalpía”, se estiman las temperaturas de salida de los fluidos. Con ellas se procede a calcular un promedio de temperatura ( $\Delta T_{log}$ ) para calcular un nuevo valor de calor ( $Q$ ) y compararlo con el anterior. Si la diferencia entre estos es mayor a la tolerancia, el programa repite el ciclo iterativo y en caso contrario converge.

A continuación se presenta en la figura 20, la interfaz del intercambiador tubo y carcasa, donde se aprecia que el usuario debe ingresar las especificaciones del equipo

( $\Delta P$  y UA), aparte se observan dos pestañas donde se pueden apreciar las características de los fluidos de entrada.

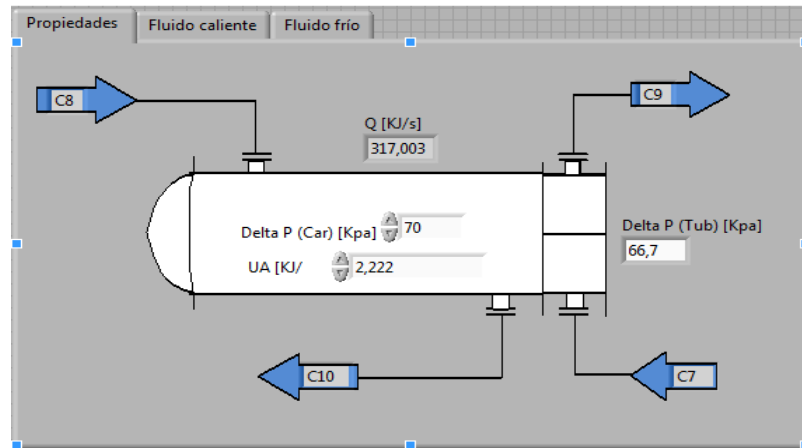


Figura.- 23 Interfaz para un intercambiador de tubo y carcaza.

#### IV.-4.3.6 Columna de destilación

Para programar y desarrollar el modelo de columna de destilación, se siguió la metodología y secuencia de cálculos realizada por (Azancot, 2010), en su tesis. Utilizando como soporte teórico el (Henley & Seader, 2000), donde se encuentra detalladamente cómo desarrollar la columna de destilación utilizando las ecuaciones de balances de masa, equilibrio, sumatoria y energía que se denominan ecuaciones MESH, que a continuación se presentan

- 1) Ecuaciones M: son los balances de masa para cada etapa.

$$M_{i,j} = L_{j-1}x_{i,j-1} + V_{j+1}y_{i,j+1} + F_jz_{i,j} - (L_j + U_j)x_{i,j} - (V_j + W_j)y_{i,j} = 0 \quad (29)$$

- 2) Ecuaciones E: Relaciones de equilibrio entre fases para cada componente.

$$E_{i,j} = y_{i,j} - K_{i,j}x_{i,j} = 0 \quad (30)$$

- 3) Ecuaciones S: Sumatorias de las fracciones molares para cada etapa.

$$\begin{aligned}(S_v)_j &= \sum_{i=1}^c y_{i,j} - 1.0 = 0 \\ (S_x)_j &= \sum_{i=1}^c x_{i,j} - 1.0 = 0\end{aligned}\quad (31)$$

4) Ecuaciones H: Ecuaciones de energía para cada etapa

$$H_j = L_{j-1}H_{L_{j-1}} + V_{j+1}H_{V_{j+1}} + F_jH_{F_j} - (L_j + U_j)H_{L_j} - (V_j + W_j)H_{V_j} \quad (32)$$

En un estudio clásico, Friday y Smith analizaron, de forma sistemática, una serie de métodos de tanteo para la resolución de las ecuaciones MESH, considerando cuidadosamente, la elección de la variable de salida para cada ecuación, donde demostraron que no hay una técnica única capaz de resolver todos los tipos de problemas.

Para el caso de separadores, donde la alimentación está constituida por componentes de volatilidades parecidas (puntos de ebullición próximos), recomendaron un método de Amundson-Pontinen modificado, denominado método del punto de burbuja (BP). El éxito se encontró en el desarrollo del algoritmo de matriz tridiagonal desarrollado por Thomas, donde manipulan las ecuaciones MESH de una manera modificada (Henley & Seader, 2000).

A continuación, se presenta en la figura 24, el esquema a seguir para calcular las propiedades de una columna de destilación, usando el algoritmo de matriz tridiagonal y como se usan componentes de volatilidades parecidas, no se tiene inconveniente para usar el método de punto de burbuja.

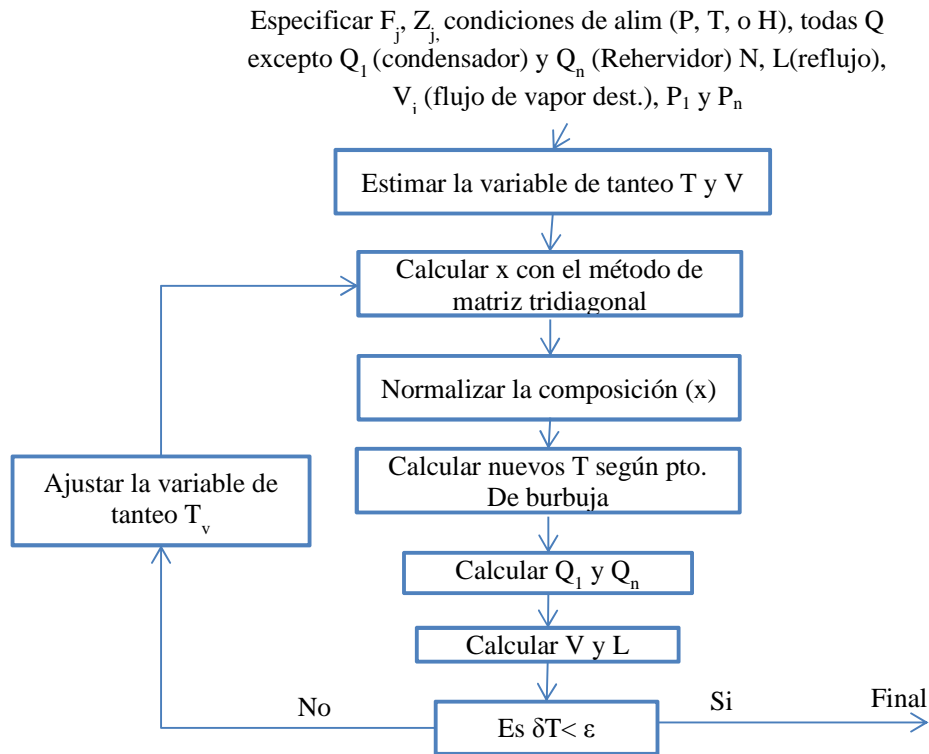


Figura.- 24 Algoritmo del método BP de Wang-Henke para destilación. (Henley & Seader, 2000).

Como se puede apreciar en la figura 28, inicialmente se deben conocer los grados de libertad entre los cuales se encuentran, el plato de alimentación con todos los datos de la corriente de entrada ( $F, T, P, z$ ), los calores inter etapa ( $Q$ ) (en caso de existir) a excepción de la primera ( $Q_1$  condensador) y última etapa ( $Q_n$  Rehervidor), la etapa de alimentación, el número de etapa ( $N$ ), el reflujo ( $L$ ), flujo de vapor destilado ( $V$ ), las presiones del tope y del fondo. Luego se procede a ajustar las variables de tanteo de temperatura y de vapor, para ello se suponen temperaturas iniciales de tanteo tanto del tope como en el fondo y el flujo de vapor inicialmente se considera constante a lo largo de la columna.

Especificadas todas las variables anteriormente mencionadas se procede a calcular la composición de líquido ( $x$ ) en cada plato realizando el algoritmo de matriz tridiagonal, y se normalizan los resultados. Una vez que se conoce la composición y la presión se calcula la temperatura de burbuja y la composición del vapor.

Luego, se procede a calcular el calor en el condensador y en el rehedidor de la columna. Para ello, se necesita conocer las entalpías (líquido y vapor) en cada plato, y realizar un balance de energía tanto en el tope como en el fondo. Posteriormente, se calcula el flujo de vapor y líquido dentro de la columna. Por último, se procede a comparar los perfiles de temperaturas y si la diferencia entre estos es mayor a la tolerancia, se comienza a iterar nuevamente pero con el nuevo perfil de temperatura de la columna. De lo contrario, el programa converge.

En la figura 25 se puede apreciar la interfaz que se realiza para que el usuario coloque las especificaciones necesarias para que el modulo pueda converger, aparte la interfaz muestra propiedades de la característica de entrada y los diversos perfiles de presión temperatura y concentración.

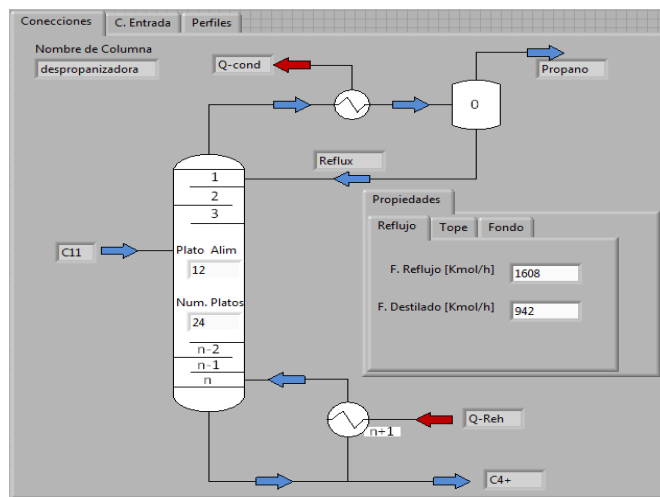


Figura.- 25 Interfaz realizada para el modulo que ejecuta la convergencia de la columna



#### IV.-4.3.6 Módulo dinámico

Para programar y desarrollar el modelo de los equipos en dinámico, se siguió la metodología planteada en (Ramirez, 2008) y en (Honeywell, 2008) donde mencionan que se deben calcular y estimar los balances de masa global, por componente y energía para cada paso de tiempo. El módulo dinámico del proceso siguió el modelo de acumulación planteado en el (Honeywell, 2008) que asume lo siguiente:

- Cada fase se encuentra perfectamente mezclada
- La transferencia de masa y calor ocurre entre las entradas al proceso y la acumulación existente en el equipo.

Esta metodología considera una corriente “reciclo” que es la que posee las características que se acumulan en el proceso, pero no es una corriente física del proceso. Esta, introduce un retraso en el cálculo del sistema dinámico permitiendo conocer en cada paso de tiempo la masa, la composición y la energía acumulada en el sistema; para ejemplificar, se colocará las ecuaciones de cómo se calcula la cantidad de masa y energía acumulada para un paso de tiempo.

Masa acum.<sub>(nueva)</sub> = masa entrada al sistema + masa acumulada <sub>(anterior)</sub> - masa sale del sistema.

Energía acum.<sub>(nueva)</sub> = energía de entrada + energía acumulada <sub>(anterior)</sub> - energía que sale.

Como se observa en la Figura.- 26, se muestra que para resolver un flash en estado dinámico se deben conocer todos los flujos, composiciones y energía que entran y salen del sistema, así como también, lo que se encuentra acumulado en el sistema (corriente de reciclo). También, se puede apreciar que estas corrientes entran a un equipo donde se “mezclan” y se determinan las propiedades (masa, energía y composición) tanto de los productos, como de la nueva acumulación. Por lo tanto, para realizar el módulo dinámico se deben conocer los flujos másicos en todo el proceso y luego determinar la acumulación en los equipos que la posean repitiendo esta secuencia de cálculo para cada paso de tiempo.

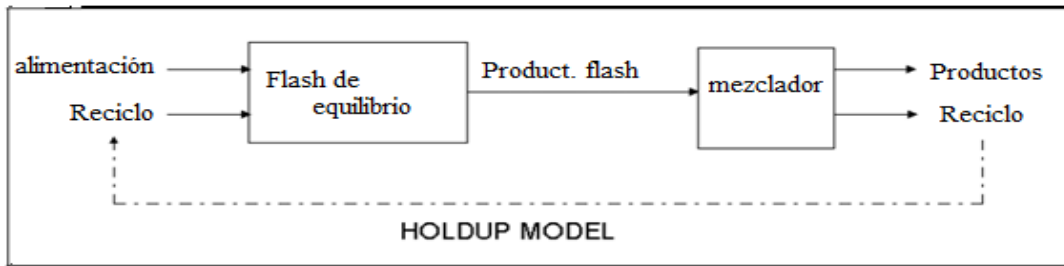


Figura.- 26 Esquema del modelo acumulación para resolver el estado dinámico de un flash. (Honeywell, 2008)

En general, para modelar y simular un proceso dinámico se deben calcular los flujos y presiones del sistema, para ello se desarrolló un módulo Flujo-Presión. Posteriormente, se estiman la cantidad de masa, composición y energía acumulada en el proceso y finalmente, se desarrolló un módulo para apreciar las características y propiedades en cada paso de tiempo para el sistema.

En la figura 27 se aprecia la interfaz del módulo dinámico para el proceso de destilación flash, no se realizó la planta completa por cuestiones de tiempo. Como se puede observar el usuario solo puede manipular las presiones fronteras (cuadros blancos) del proceso, aparte el usuario puede definir si las válvulas son check o no, y puede apreciar el nivel del tanque, la temperatura y la composición de gas y líquido que salen del flash a medida que transcurre el tiempo.

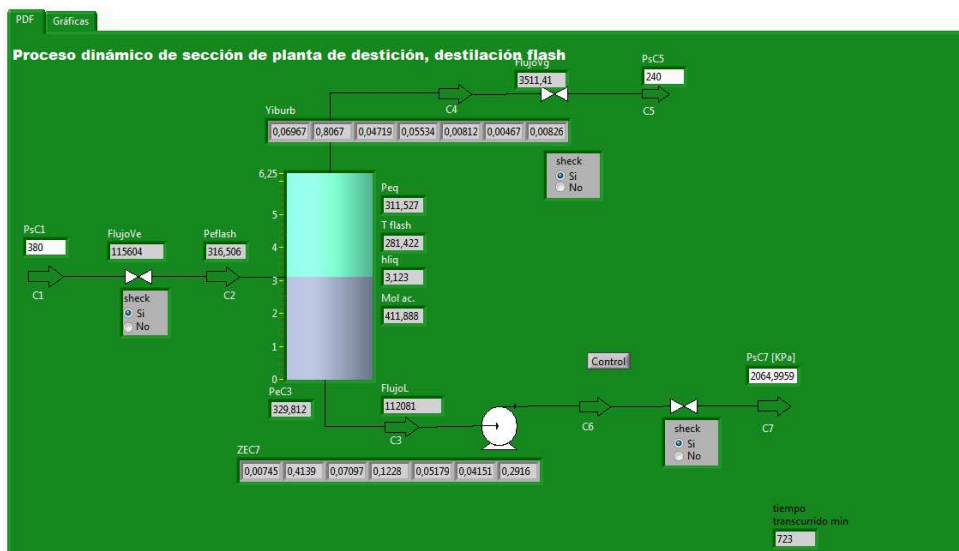


Figura.- 27 Interfaz realizada para la parte dinámica del proceso destilación flash.

**IV.-4.3.6.2 Módulo Flujo-Presión**

Para el desarrollo del módulo, se asume que son conocidas las presiones fronteras (entradas y salidas) del proceso y se calcula el flujo que hay en todas las corrientes del proceso.

Para calcular el flujo, se deben tener dimensionado y/o especificados los equipos que generan cambios de presión en el proceso (bombas, válvulas, intercambiadores de calor, etc). y mediante sus ecuaciones de diseño calcular el flujo.

**IV.-4.3.6.2 Módulo Mezclador**

Una vez que se conocen los flujos del sistema y las condiciones iniciales acumuladas en el flash (del estado estacionario), se realizan los balances de masa, energía y composición, para estimar las nuevas condiciones acumuladas y arrojar condiciones específicas del proceso.

Para el caso del flash, se calcula la cantidad masa acumulada, la energía acumulada y composición de los flujos de vapor y líquido que posee el flash, que serán iguales a las composiciones de salida respectivas. Posteriormente, suponiendo que a causa de la baja densidad del gas, la acumulación de masa en la fase vapor es despreciable, se puede establecer como criterio que la presión de burbuja en la fase de equilibrio es la nueva presión que posee flash. (Smith & Corripio, 1994).

En el anexo se muestra la programación realizada para este módulo (Ver figura 43)

**IV.-4.3.6.2 Módulo Controlador**

Para desarrollar el módulo se procede a programar las ecuaciones que definen cada tipo de controlador (proporcional, integral y derivativo). Para ello, se utilizó el (Smith & Corripio, 1994) donde se detalla cómo determinar la salida de los controladores, conociendo el punto de control (set point "SP"), la ganancias Proporcional, integral y derivativas ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ) y la variable que se controla (PV).

En la figura 28 se presenta la interfaz del módulo, donde se aprecia que el usuario debe especificar las ganancias según el tipo de controlador, el tipo de acción, el set point (SP) y si lo desea puede establecer si coloca el controlador en manual para mover la apertura de la valvula (OP) o automático y manipular el set point (SP).

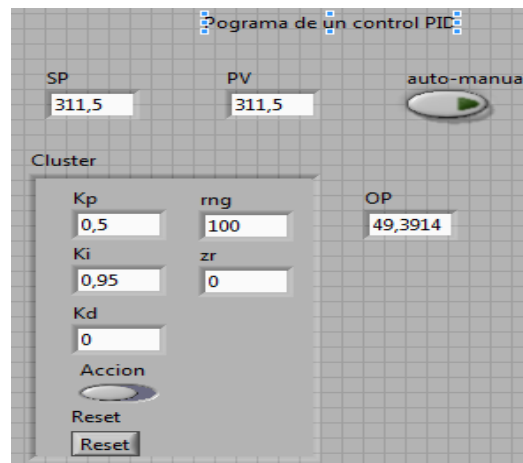


Figura.- 28 Interfaz del controlador desarrollado para el programa.

#### IV.5 Validar la herramienta, comparando y analizando los resultados que se obtienen de ella con un simulador de procesos comercial.

Para validar la herramienta desarrollada, se procedió a comparar los resultados calculados por el programa, con los arrojados por el simulador comercial UNISIM Design. En la figura 20 se muestra el diagrama de flujo de la planta que se realizó en el simulador UNISIM Design como en la herramienta desarrollada en este trabajo.

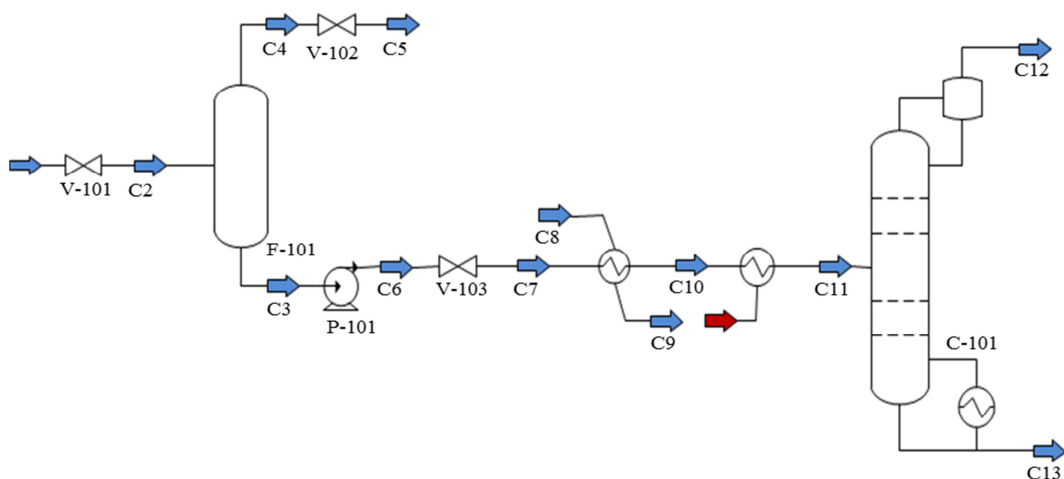


Figura.- 29 Diagrama de flujo de la planta de destilación para un corte ligero.

Para ello, se evaluarán inicialmente dos casos estacionarios y se analizarán sus resultados, mediante tablas comparativas que muestran el resultado de ambas simulaciones. De manera análoga, para el caso dinámico, se presentan gráficas y tablas, en las cuales, de igual manera, se alterarán diversas variables en las simulaciones y se comparan los resultados.

Para realizar la comparación, se muestran los datos de las variables más relevantes en la evaluación del proceso como son: flujos, temperatura, presión, fracción de vapor, entalpía y entropía; así como también, se presenta el porcentaje de error que existe entre los dos valores antes mencionados. En la Tabla N° 6, se muestran los balances de masa y energía para las primeras dos corrientes. Los datos son obtenidos de un simulador comercial y del programa desarrollado en este trabajo (SimProEIQ). En los anexos se encuentran los balances de masa y energía para todas las corrientes del proceso. En este caso la primera corriente “C1” es la entrada al proceso y la corriente “C2” es la corriente posterior a la válvula V-101 (Ver Figura 24).

Tabla N° 6 Tabla comparativa donde se muestran valores de diversas variables para las primeras dos corrientes del proceso.

	C1			C2		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	380	380,00	0,00	319,36	316,46	0,91
Temperatura (K)	288,10	285,5	0,90	283,70	281,8	0,67
Flujo (Kgmol/h)	1897,52	1898,00	0,03	1897,52	1898,00	0,03
Frac. de Vapor (fi)	0	0	0,00	0,036	0,0373	3,19
Entalpía (KJ/Kgmol)	-154192	-153928	0,17	-154192	-153928	0,17
Entropía (KJ/Kgmol C)	84,16	84,74	0,69	84,20	84,87	0,79

Como se muestra en la tabla 6, se tienen los valores que describen a dos corrientes del proceso. Comparando entre programas, se apreció que la presión, la temperatura, el flujo, la entalpía y entropía en ambas corrientes, el error no supera el 0,9%. Como dicha tendencia fue análoga para todas las corrientes existentes en el proceso, se considera que los programas desarrollados para estas propiedades son bastantes precisos.

Para la fracción de vapor, de la corriente de entrada “C2” se aprecia que el error es mayor que los demás (3,19%). Esto puede deberse a que la fracción de vapor se calcula a partir

de la composición de la mezcla y la constante de equilibrio ( $K_i$ ), donde ésta depende del método termodinámico empleado. Para el caso de la simulación realizada en UNISIM Design se usó el modelo Peng-Robinson, mientras que el programa desarrollado, se hizo mediante el modelo termodinámico ideal. Esto se realizó con intención ya que el programa UNISIM Design no incluye un modelo termodinámico ideal y por cuestiones de tiempo, se programó únicamente el modelo termodinámico ideal en la herramienta. Sin embargo, se realizó de manera genérica, para que futuros usuarios puedan agregarle uno o más modelos termodinámicos al programa.

En la tabla 7, se muestra la composición de la corriente líquido (Fondo) y vapor (Tope) que son resultado de la separación flash y de la columna de destilación del proceso. Como se puede apreciar de manera general los valores que representan el líquido no poseen un error mayor al 5%. Esto puede deberse a errores de precisión en los métodos numéricos y del modelo termodinámico empleado por cada programa.

Tabla N° 7 Tabla que compara los resultados de composición obtenidos por el UNISIM Design y el desarrollado, para el flash y la columna.

	Flash						Columna					
	Unisim Design		SimProEIQ		Error%		Unisim Design		SimProEIQ o		Error%	
	Fondo	Tope	Fondo	Tope	Fondo	Tope	Fondo	Dest.	Fondo	Dest.	Fondo	Tope
etano	0,0084	0,0630	0,0084	0,0696	0,00	10,42	0,0000	0,0187	0,0000	0,0164	0,00	12,51
Propano	0,4186	0,7999	0,4139	0,8068	1,13	0,86	0,0027	0,9313	0,0027	0,9081	0,00	2,49
i-butano	0,0706	0,0505	0,0709	0,0472	0,43	6,61	0,0939	0,0419	0,0689	0,0734	0,00	75,16
n-butano	0,1218	0,0600	0,1228	0,0574	0,79	4,39	0,2141	0,0081	0,2238	0,0022	4,52	72,63
i-pentano	0,0512	0,0095	0,0518	0,0081	1,09	15,14	0,0928	0,0000	0,0952	0,0000	2,53	0,00
n-pentano	0,0411	0,0056	0,0415	0,0046	1,08	17,48	0,0744	0,0000	0,0763	0,0000	2,57	0,00
hexano	0,2883	0,0113	0,2916	0,0083	1,16	26,77	0,5221	0,0000	0,5356	0,0000	2,58	0,00

Para la comparación en el vapor se puede apreciar que los componentes más volátiles poseen mayor composición que el resto. En el caso del compuesto de interés (propano), se aprecia que la composición en el flash de ambos programas es de aproximadamente 80% con un error entre ellos de 0,86%. Para el resto de los compuestos, el error es mayor debido a la precisión, al modelo termodinámico que Unisim Design es Peng-Robinson y el desarrollado es ideal. Similarmente para la

columna se aprecia que en el destilado el porcentaje de error para el compuesto de interés (propano) es de 2,5% y para el resto de los componentes el error aumenta, ya que por motivos de precisión y al tener modelos termodinámicos diferentes, los resultados no son exactos.

Para analizar la planta, se procedió a comparar el primer caso (1) (planta especificada según el manual de UNISIM Design), con un segundo estado estacionario (2), donde al flash se le aumento 5% la presión de operación y a la columna se le aumentó 5% la relación de reflujo. En la Tabla 8 se comparan las composiciones de líquido (fondo) y vapor (tope), tanto para el flash como la columna.

Tabla N° 8 Tabla de datos comparando la composición para el flash y la columna de los dos estado estacionarios.

	Flash				Columna			
	SimProEIQ (1)		SimProEIQ (2)		SimProEIQ (1)		SimProEIQ (2)	
	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor
Flujo molar (Kmol/h)	1820	77,95	1842,37	55,63	996,04	824,00	1019,17	823,20
Etano	0,0084	0,0696	0,0074	0,0738	0,0000	0,0164	0,0000	0,0180
Propano	0,4139	0,8068	0,4139	0,8041	0,0027	0,9081	0,0024	0,9319
i-butano	0,0709	0,0472	0,0709	0,0465	0,0689	0,0734	0,0883	0,0491
n-butano	0,1228	0,0574	0,1229	0,0546	0,2238	0,0022	0,2207	0,0009
i-pentano	0,0518	0,0081	0,0528	0,0080	0,0952	0,0000	0,0930	0,0000
n-pentano	0,0415	0,0046	0,0415	0,0046	0,0763	0,0000	0,0746	0,0000
hexano	0,2916	0,0083	0,2916	0,0082	0,5356	0,0000	0,5233	0,0000

En la tabla 8, se puede apreciar la composición de salida del flash y la columna de ambos programas. Se observa que el aumento de presión (5%) en el flash, no varía mucho la composición de la salida; sin embargo, se detalla que para el segundo caso la cantidad de flujo que sale por el tope (vapor) y por el fondo (líquido) varían. Esto se debe al aumento de presión, donde se nota que disminuye el flujo de vapor y por ende, aumenta el de líquido. Analizando esto, se considera que el resultado es el esperado, ya que un aumento de presión incrementa la temperatura de ebullición de los componentes y hace más difícil su separación y su cambio de estado.

Estudiando la columna sucede algo similar que con el flash. Pero al aumentar la relación de reflujo 5%, la separación de los compuestos mejora ligeramente la separación de las salidas, el flujo de vapor disminuye y el de líquido aumenta. Este resultado es el esperado ya que al aumentar la relación de reflujo disminuye el flujo de destilado, pero mejora la separación de los componentes.

Si se desea apreciar más información de las corrientes, en el anexo, se pueden observar los balances de masa y energía para este segundo caso

### **Dinámico**

Para el estado dinámico se muestra en la figura 21 como varia el nivel del líquido en el flash cuando se disminuye 10 KPa la presión de salida. Esto comparando la simulación realizada en este trabajo y un simulador de procesos comerciales.



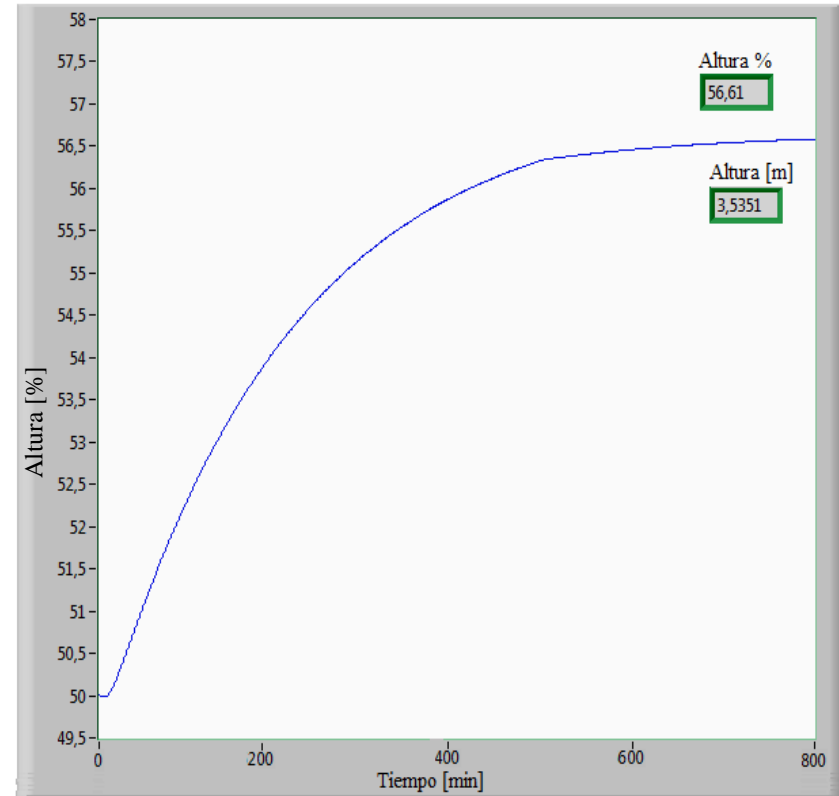
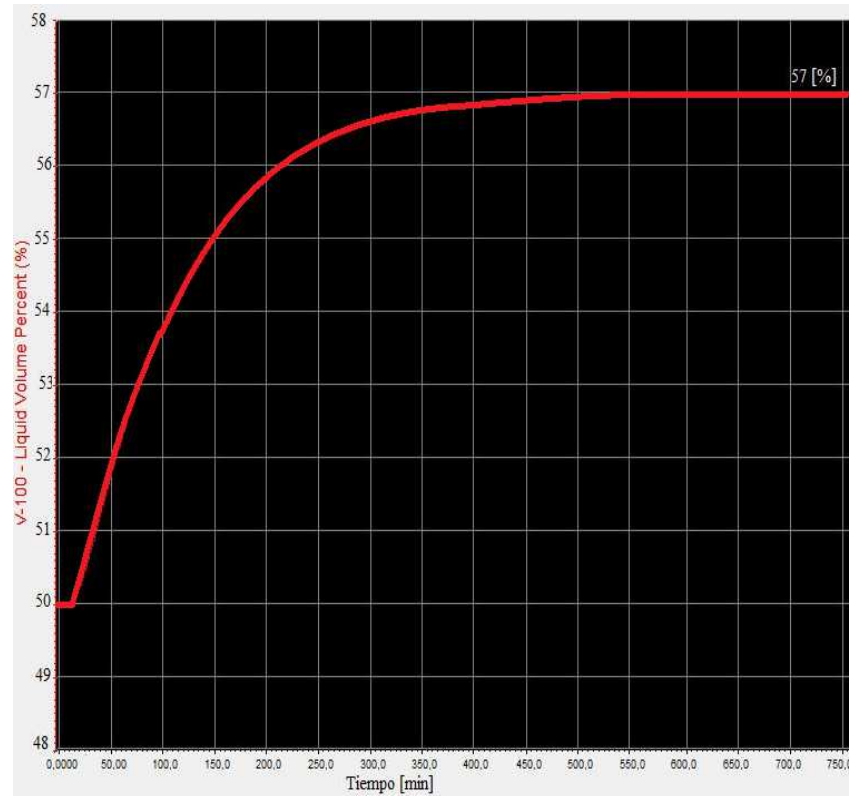


Figura.- 30 Comparación dinámica del nivel de líquido acumulado en el flash, realizada en UNISIM Design y la herramienta desarrollada (SimProEIQ).

Como se aprecia en la Figura.- 30, el nivel del líquido del flash comienza a aumentar con cada paso de tiempo. El resultado es el esperado ya que al disminuir la presión de salida de vapor en el flash, se obtiene un aumento del flujo de salida del vapor, y del nivel de líquido acumulado.

Para este caso donde se perturbo la presión en el tope de flash, tanto en el simulador de procesos como en el programa realizado, en ambos, se aprecia un aumento de nivel y con la misma dinámica. La simulación realizada con UNISIM Design se aprecia que se estabiliza ligeramente más rápido ya que el Tau para este es de 140 segundos, mientras que en el programa desarrollado en este trabajo se observa que es de 180 segundos. Y comparando ambos estados “estacionarios” se aprecia que el nivel alcanzado por el UNISIM Design es de 57% mientras que en el desarrollado es de 56,61%, lo que genera una desviación menor al 2%, por lo que se considera que el programa es preciso y es bastante fiable a la hora de usar.

#### IV.6 Desarrollar una interfaz amigable y de fácil entendimiento para los usuarios que podrán ser estudiantes, profesionales afines y profesores.

Para practicidad y entendimiento de los usuarios finales, se desarrollan unas interfaces de fácil comprensión para toda persona que posea conocimientos en el área. Para ello se colocan diversas pestañas, ventanas, botones e ilustraciones que hacen referencia a los equipos y al proceso en general que desarrolla el usuario.

En la Figura.- 31 se muestra como ejemplo la interfaz para una bomba donde se observa, que en las casillas blancas el usuario debe especificar la eficiencia y el aumento de presión en el fluido que genera la bomba y en las casillas de color gris se pueden ver varias propiedades y especificaciones de la bomba.

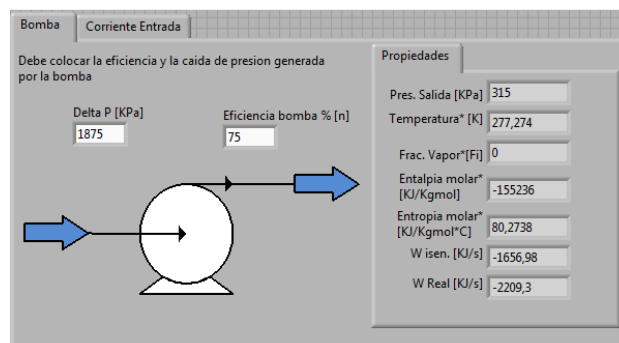


Figura.- 31 Interfaz de una bomba en el programa desarrollado.

Esta interfaz sigue la metodología de cálculo de bibliografía reconocida y la estructura de programación modular secuencial que menciona el (Scenna, 1999). Además se crearon funciones similares existentes en un simulador de procesos de forma que pueda crecer el programa con orientación con la misma estructura lo más parecida a un simulador comercial. Esto para no confundir a usuarios que utilicen ambos programas y aparte para tener una analogía con programas comerciales que tienen tiempo y aceptación en el mercado mundial.

#### **IV.7 Desarrollar un manual de usuario.**

Para mayor comprensión y entendimiento acerca del funcionamiento del programa, se elabora un manual para el usuario, donde se explica detalladamente los pasos que debe seguir para usar la herramienta de manera adecuada y no cometer posibles errores. También se menciona cómo realizar cualquier otro proceso con los equipos que se desarrollaron en la herramienta.

El manual consta de dos partes, donde en la primera parte se hace una introducción al programa, se explica brevemente como fue desarrollado y que equipos se pueden simular con el programa. La segunda parte menciona los requisitos (programas que se deben de disponer), se hace una mención acerca de cómo abrir y ejecutar el programa y como elaborar una simulación.

El manual de usuario se encuentra en la sección de anexos.

## CAPÍTULO V

### V.1 Conclusiones

Una vez realizado este Trabajo Especial de Grado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Al seleccionar una planta simulada se obtienen los datos necesarios para validar y comparar los modelos y las simulaciones que se propusieron en este trabajo.
- Para realizar la simulación de cada operación unitaria que se modeló y simuló en este trabajo, se deben especificar un número particular de variables, los grados de libertad.
- Las corrientes se especifican con dos variables intensivas, las mismas pueden ser presión, temperatura, entalpía y entropía, además del flujo y la composición de la mezcla.
- El módulo corriente es el que es programa donde se encuentran los subprogramas que calculan todas las propiedades termodinámicas.
- Se desarrolló el modulo corriente de tal manera que recibe cuatro grados de libertad y como resultado para el siguiente equipo entrega todas las propiedades termodinámicas y físico-químicas.
- Los módulos de los equipos (bomba, flash, intercambiadores, etc) reciben todas las propiedades y entregan a la corriente los grados de libertad.
- SimProEIQ permite estudiar y evaluar la planta en estado estacionario y dinámico.
- SimProEIQ posee errores menores al 5% en el cálculo de las propiedades termodinámicas y físico químicas, comparándolo con UNISIM Design.
- El programa desarrollado permite estudiar y simular unidades de destilación que posean mezcla de hidrocarburos y se comporten de manera ideal
- SimProEIQ permite controlar diversas variables del proceso usando el modulo controlador.
- La resolución de estado dinámico requiere conocer las condiciones acumuladas en cada paso de tiempo y se realiza, mediante la corriente reciclo.
- El estado dinámico posee un módulo flujo-presión que resuelve para cada paso de tiempo todos los flujos y presiones del sistema.

## V.2 Recomendaciones

A continuación se presentan diversas de recomendaciones con la finalidad de mejorar o ampliar los resultados obtenidos mediante la realización de futuros proyectos.

- Usar el método de la falsa posición para calcular la fracción de vapor.
- Agregar modelos termodinámicos, permitiendo así suministrar mezclas no ideales y simular a altas presiones.
- Ampliar el sistema de unidades de tal manera que el usuario pueda trabajar con cualquier sistema de unidades .
- Ampliar la base de datos, suministrando mayor cantidad de componentes.
- Realizar un modelo riguroso para la bomba donde se le coloque o especifique las curvas características y permita calcular el punto de operación.
- Realizar un modelo riguroso para la columna (ejem inside-Out) que permita trabajar con mezclas no ideales y no condensables
- Colocar distintas alarmas y advertencias para cuando el usuario coloque algo errado, creando así mayor rigurosidad al programa.
- Crear en la interfaz una paleta con los equipos de manera tal que el usuario pueda extraerlos fácilmente.
- Mejorar los métodos de cálculo para obtener una mejor y más rápida convergencia.
- Trabajar la programación desde un solo lenguaje evitando mezclar programas, para así obtener mayor velocidad de convergencia en métodos y evitar usar recursos de la computadora ejecutando diversos programas.

## CAPÍTULO VI

### BIBLIOGRAFÍA

- Abdul, M. (1998). Operation and controlling dividing wall distillation columns.
- Aristimuño, A. (2012). *Monitoreo y control de una unidad de destilación continua a escala piloto empleando un lenguaje de programación informático*. Caracas.
- Azancot, L. (2010). *Modelado matemático y simulación en estado estacionario y dinámico de una columna recuperadora de metanol de platos perforados*. Tesis de Pregrado, Caracas.
- Blanco, E., Inciarte, M., & Mora, J. (2010). *Desarrollo de un sistema SCADA para una columna de destilación Benceno-Tolueno*. Artículo.
- Drésden, B., & Franceschi, F. (2010). *Modelado y simulación de intercambiadores de calor industriales para mezclas multicomponentes a través del uso del lenguaje LabView, con la finalidad de hacer estudios de evaluación, operación y control*. Tesis de Pregrado, Caracas.
- García de Jalón, J., Rodríguez, J. I., & Vidal, J. (Diciembre de 2005). *Aprenda MatLab como si estuviera en primero*. Madrid, España.
- H. Pomares, B. (2005). *Prácticas de Introducción al uso de Computadores (base de datos)*. Recuperado el Enero de 2013
- Henley, E. J., & Seader, J. D. (2000). *Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química*. Mexico: Reverté S.A.
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios básicos y cálculos en ingeniería química* (Sexta ed.). Ciudad de México: Prentice-Hall.
- Honeywell. (2008). *Unisim Design Dynamic Modeling manual reference*. Canada.
- Incropera, F. (2005). *Transferencia de calor y masa* (Cuarta edición ed.). Mexico: Prentice Hall.
- National Instruments. (Abril de 2003). *LabView User Manual*. Texas, USA.

- Perry, R. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* (Séptima ed.). Aravaca, España: McGraw Hill.
- Ramirez, W. F. (2008). *Computational Methods in Process simulation*. Elsevier Science & Technology Books.
- Scenna, N. J. (1999). *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*.
- Smith, B. D. (1983). *Design of equilibrium stage processes*. Buford D. Smith: McGraw Hill.
- Smith, C., & Corripio, A. (1994). *Control Automático de Procesos*. México: Limusa.
- Universidad de Alicante. (s.f). *Servicio informatico de la Universidad de Alicante*. Recuperado el 9 de 2013, de <http://si.ua.es/es/documentos/documentacion/office/access/teoria-de-bases-de-datos.pdf>
- Universidad Nacional de Asunción. (Marzo de 2005). *Introducción a SciLab*. La Asunción, Paraguay.
- Van Ness, H. C., Smith, J. M., & Abbott, M. M. (2007). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. Mexico D.F.: McGraw Hill.

## APENDICE

Ecuación de Bernoulli para una válvula:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \quad (33)$$

Donde

$P_{1,2}$ =Presión a la entrada y a la salida (Pa).

$\rho_{1,2}$ = Densidad del fluido a la entrada y salida de la válvula (Kg/m<sup>3</sup>)

$V_{1,2}$ = velocidad del fluido (m<sup>3</sup>/h).

Y como la velocidad de flujo de salida es mucho mayor que la entrada la ecuación se reduce a la siguiente:

$$V_2 = \sqrt{2 * \frac{\Delta P}{\rho}} \quad 34$$

Donde finalmente se aprecia que para la válvula debe ser especificada la caída de presión y el flujo de entrada

### **Intercambiador de calor:**

La máxima transferencia de calor posible en el intercambiador de calor, se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_{max} = \dot{m} * C_{pi} \quad (35)$$

Donde:

$q_{max}$ = Flujo de calor máximo transferible (KJ/h).

$m$ =Flujo molar de la entrada (Kgmol/h).

$C_{pi}$ = Capacidad calorífica a presión constante (Unidades).

Una vez que se determina cual es el fluido con el flujo máximo y mínimo de calor, se comparan y se establece una relación de transferencia de flujo de calor:



$$Cr = \frac{q}{q_{max}} \quad (36)$$

Donde:

Cr= relación de transferencia de flujo de calor (adim)

q= Flujo de calor mínimo (KJ/h).

También se debe calcular el Número de unidades transferidas (NUT) que se encuentra expresado de la siguiente manera:

$$NUT = \frac{UA}{m*q} \quad (37)$$

Donde:

NUT= número de transferencia de unidades. (adim)

UA=coeficiente global de transferencia de calor

Conocidos estos valores se procede a calcular la eficiencia del intercambiador mediante la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{(1 - e^{(-NUT*(1-Cr)})}{(1 - Cr * e^{(-NUT*(1-Cr)})} \quad (38)$$

Donde:

$\varepsilon$ =eficiencia (adim).

Con esta eficiencia se estima un valor inicial del calor intercambiado (Q). se calcula mediante la ecuación.

$$Q = \varepsilon * q * (Tce - Tfe) \quad (39)$$

Donde

Tce= Temperatura de entrada del fluido caliente (K).

Tfe=Temperatura de entrada del fluido frio (K)

Q= calor transferido.(KJ/h)

Ahora comienza el cálculo iterativo.

Inicialmente se calculan las entalpías de salida, a partir de las entalpías y flujos de entradas y el calor calculado anteriormente.

$$hsal_i = \frac{Q}{F_i} + he_i \quad (40)$$

Donde:

$hsal_i$ = entalpía de salida del fluido caliente o frío.

$F_i$ = flujo molar del fluido caliente o frío (Kgmol/h).

$he$ = entalpía de entrada del fluido caliente o frío.

Conocidas las entalpías, los flujos la composición y presión de salida de cada parte del intercambiador (tubo y carcasa) se calculan mediante el modulo corriente “presión-entalpia” unas temperaturas estimadas que son utilizadas para calcular la siguiente ecuación de temperatura media Logaritmica.

$$\Delta Tlog = \frac{(Tce-Tfs)-(Tcs-Tfe)}{\log\left(\frac{Tce-Tfs}{Tcs-Tfe}\right)} \quad (41)$$

Dónde:

$\Delta Tlog$ = temperatura media logarítmica.

$Tfs$ = Temperatura de salida del fluido frío (K).

$Tcs$ = Temperatura de entrada del fluido caliente (K).

Posteriormente se calcula nuevamente un calor utilizando la ecuación:

$$Q = UA * \Delta Tlog \quad (42)$$

Dicho calor se compara con el calculado anteriormente, donde si la diferencia entre ellos es mayor a la tolerancia, el programa repite el ciclo iterativo y en caso contrario se culmina el ciclo iterativo, arrojando como resultado calor transferido entre los fluidos y las temperaturas de salida .

-

**ANEXOS**

## ANEXO 1

Tabla N° 9 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a las válvulas que rigen el proceso.

	VLV-100	VLV -101	VLV -102
Caída de Presión (KPa)	70	70	70

Tabla N° 10 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a la bomba que posee el proceso.

	Bomba
$\Delta P$ (KPa)	1875
Efic. adiabática (%)	75

Tabla N° 11 Especificaciones que asigna el manual de UNISIM Design a los intercambiadores existentes en el proceso.

	Inter. Tub-Car	Inter. simple
$\Delta P$ (KPa)	-----	70
$\Delta P$ (Tubos) (KPa)	70	-----
$\Delta P$ (Carcaza) (KPa)	70	-----
UA (KJ/C*h)	8000	-----
F. de energía (KJ/h)	-----	9,10e6

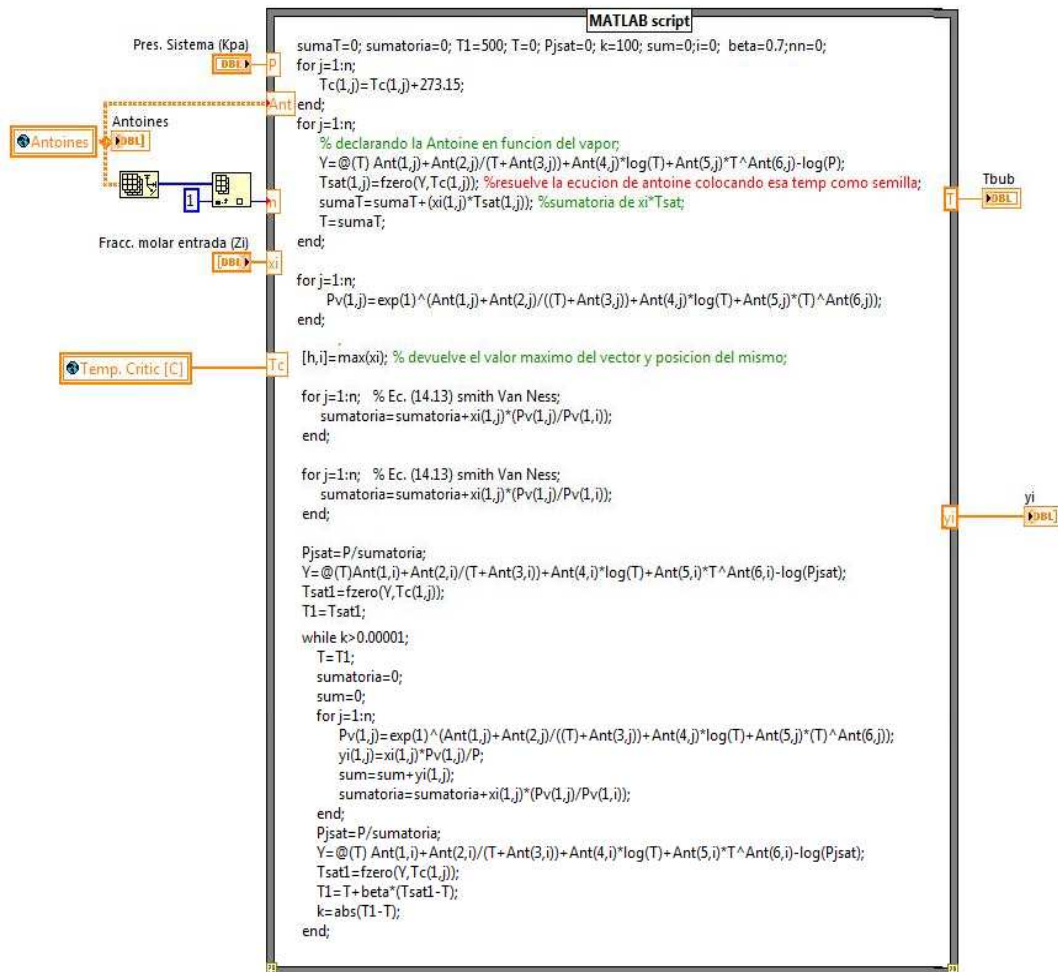


Figura.- 32 Programación de la temperatura de Burbuja en Matlab script

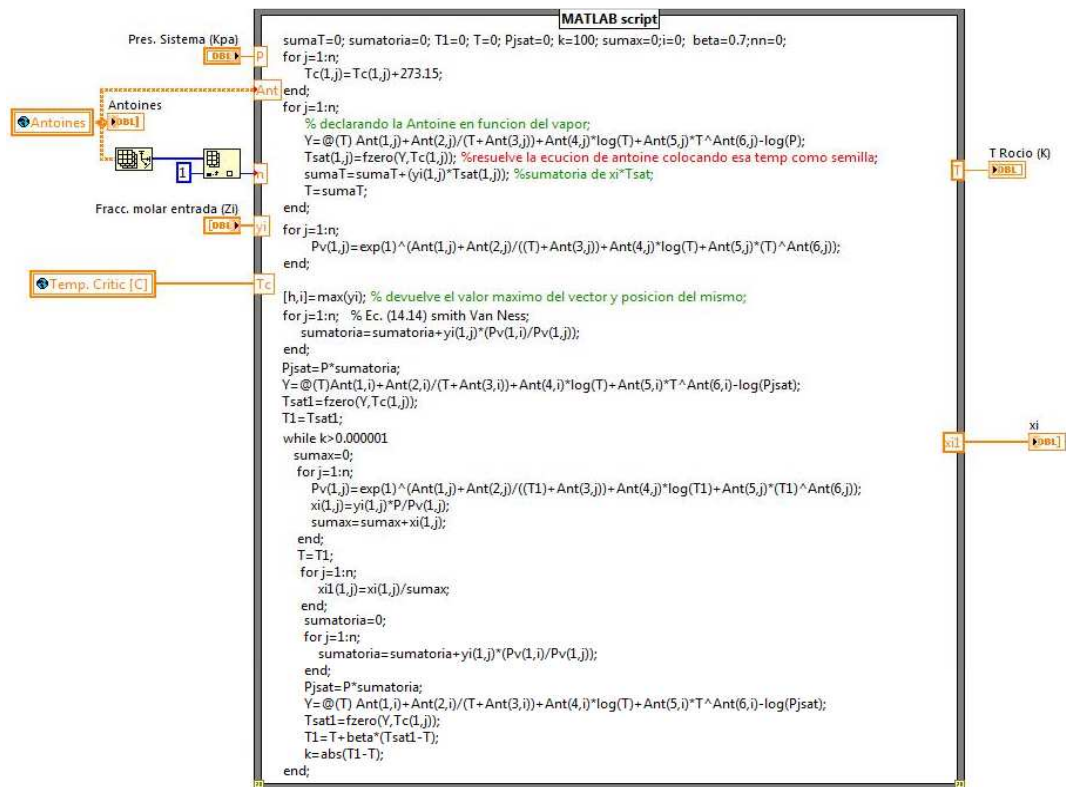


Figura.- 33 Programación la temperatura de rocío en Matlab script

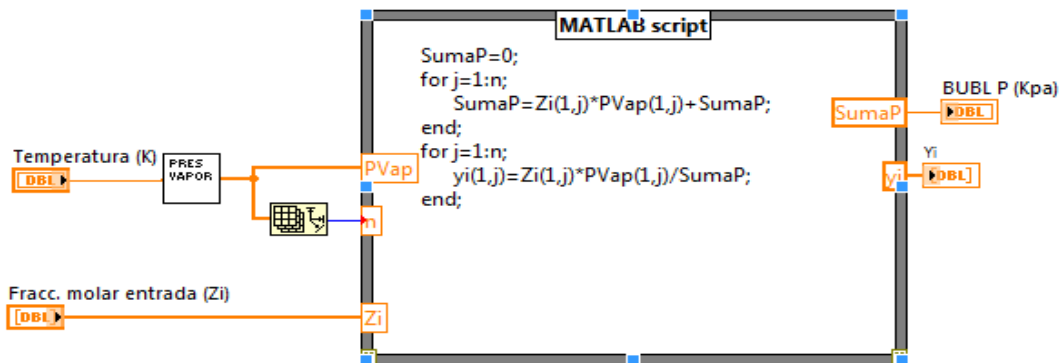


Figura.- 34 Programación del cálculo de la presión de burbuja.

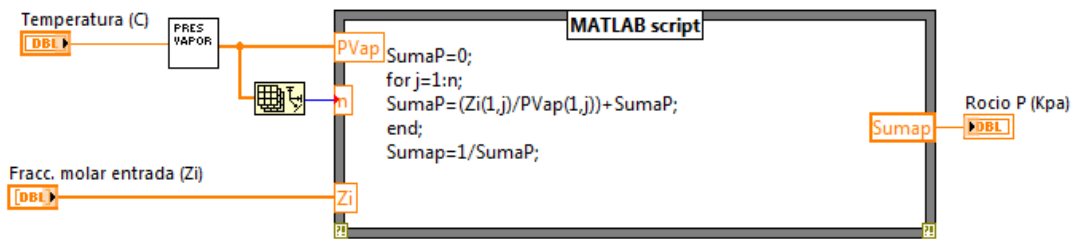


Figura.- 35 Programación del cálculo de presión de rocío

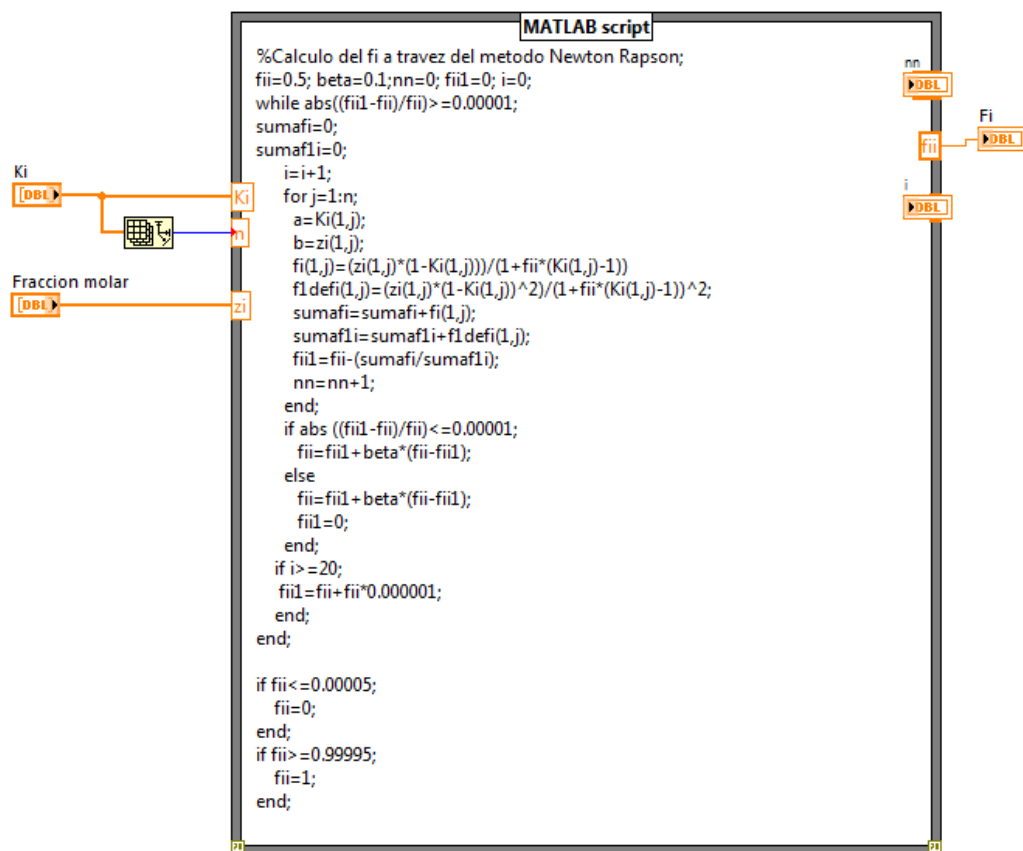


Figura.- 36 Programación del cálculo de la fracción de vapor.

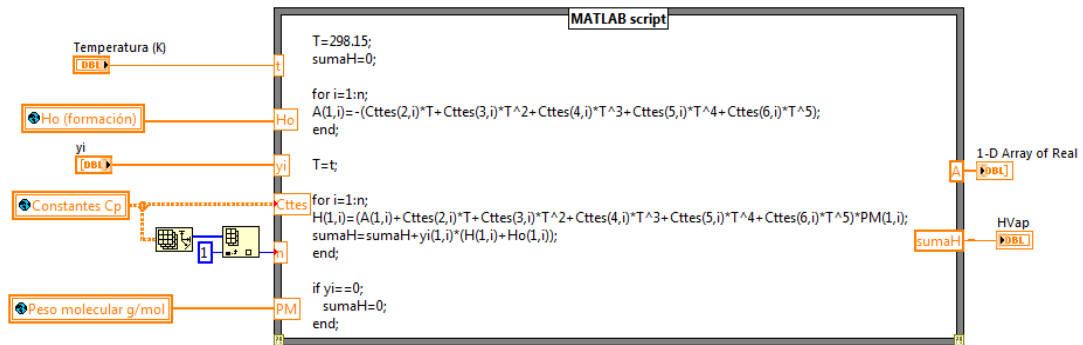


Figura.- 37 Programación del cálculo de entalpía para el vapor

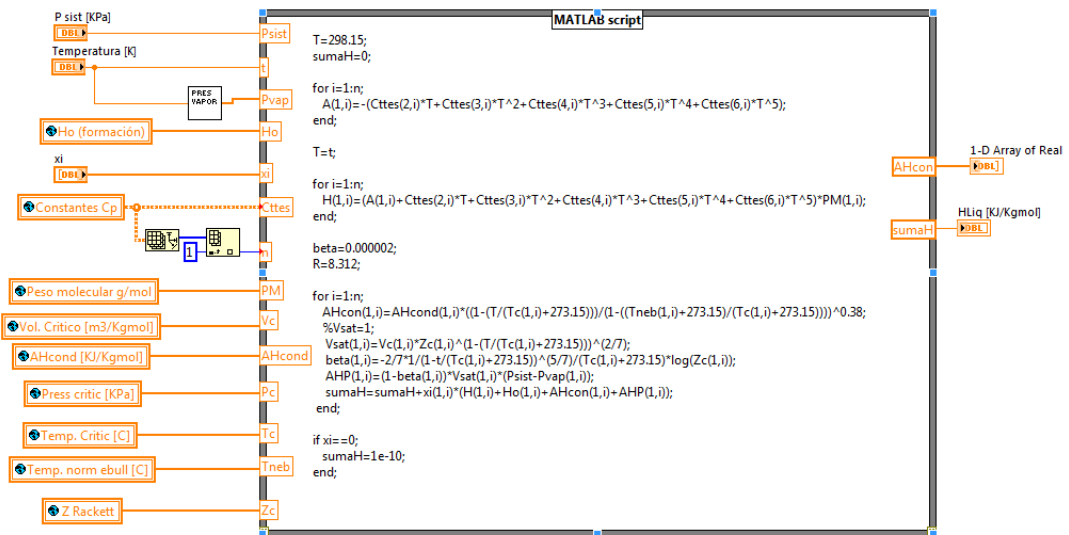


Figura.- 38 Programación para el cálculo de entalpía en el líquido.



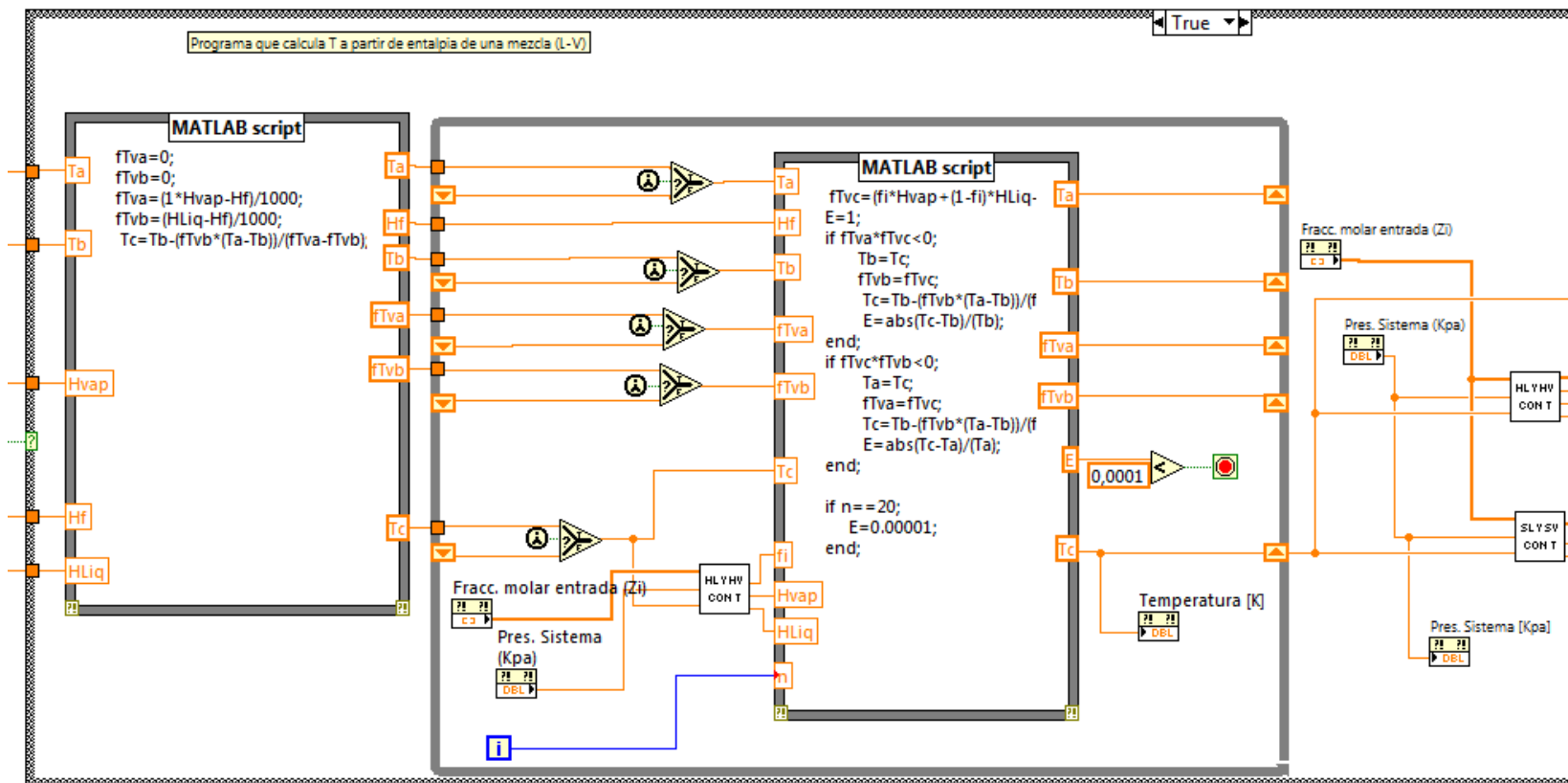


Figura.- 39 Diagrama de bloque desarrollado para el cálculo iterativo del cálculo de la temperatura para el modulo corriente presión-entalpía.

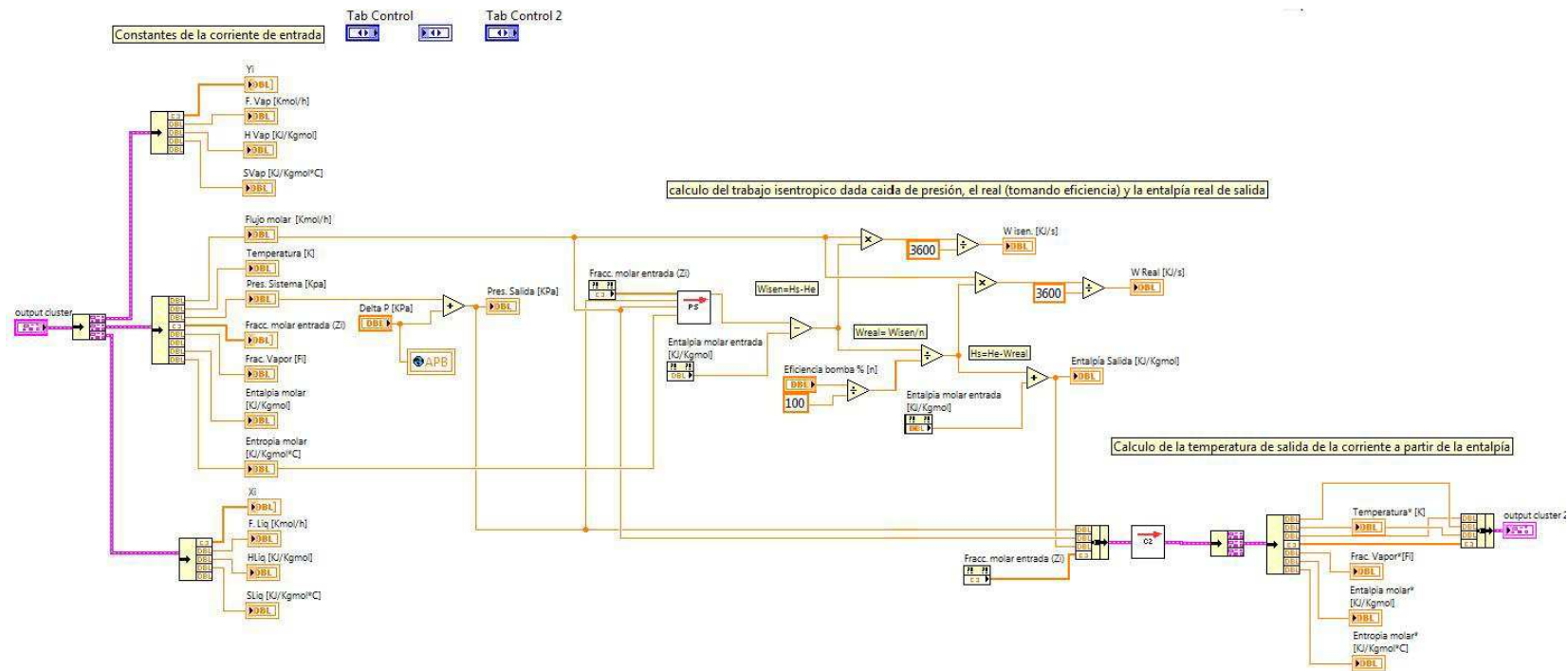


Figura.- 40 Programación en el bloque de diagrama del LabVIEW para el modulo bomba.

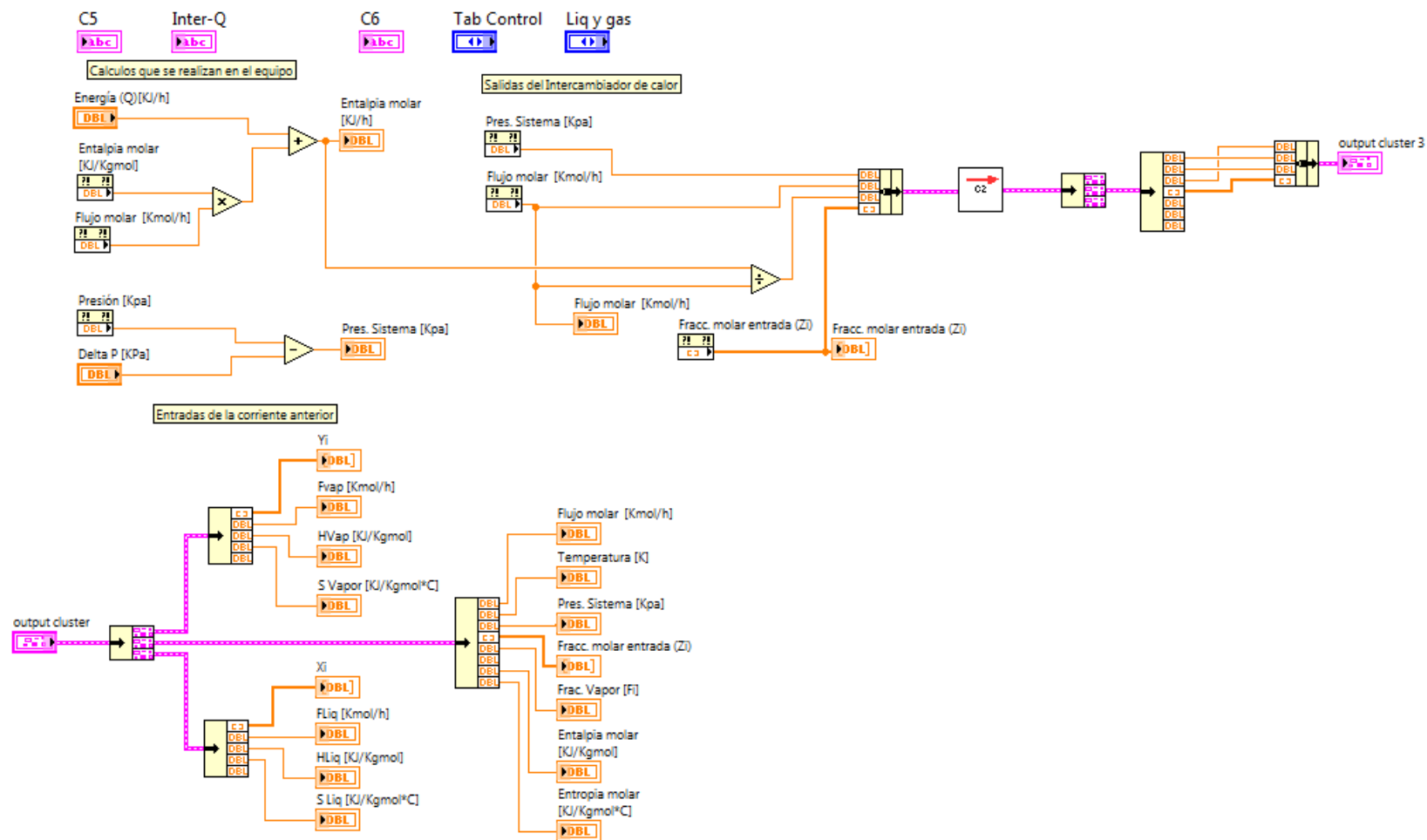


Figura.- 41 Programación en el diagrama de bloque para un intercambiador de calor sencillo.

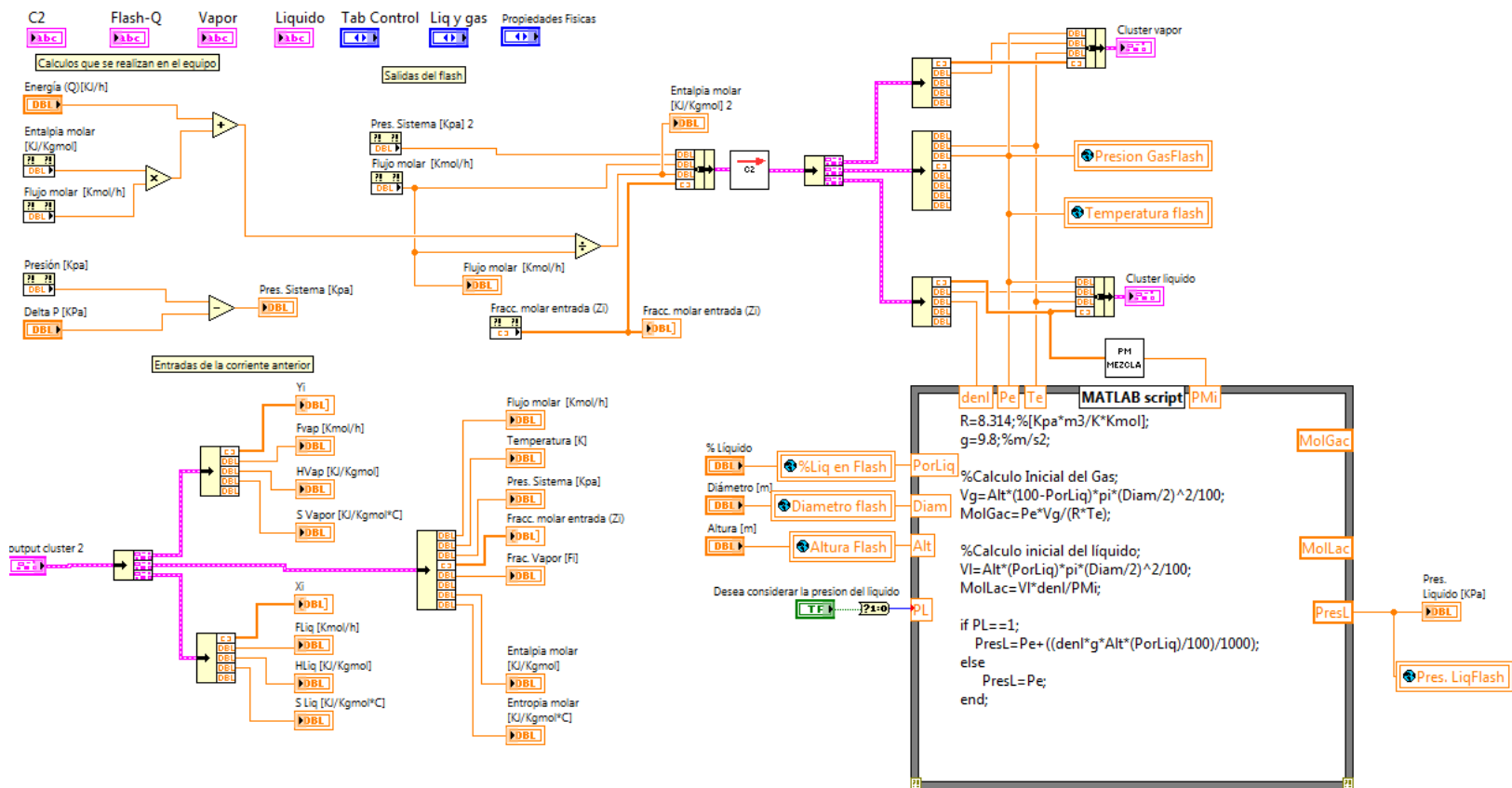


Figura.- 42 Diagrama de bloque que ejecuta la programación del flash.

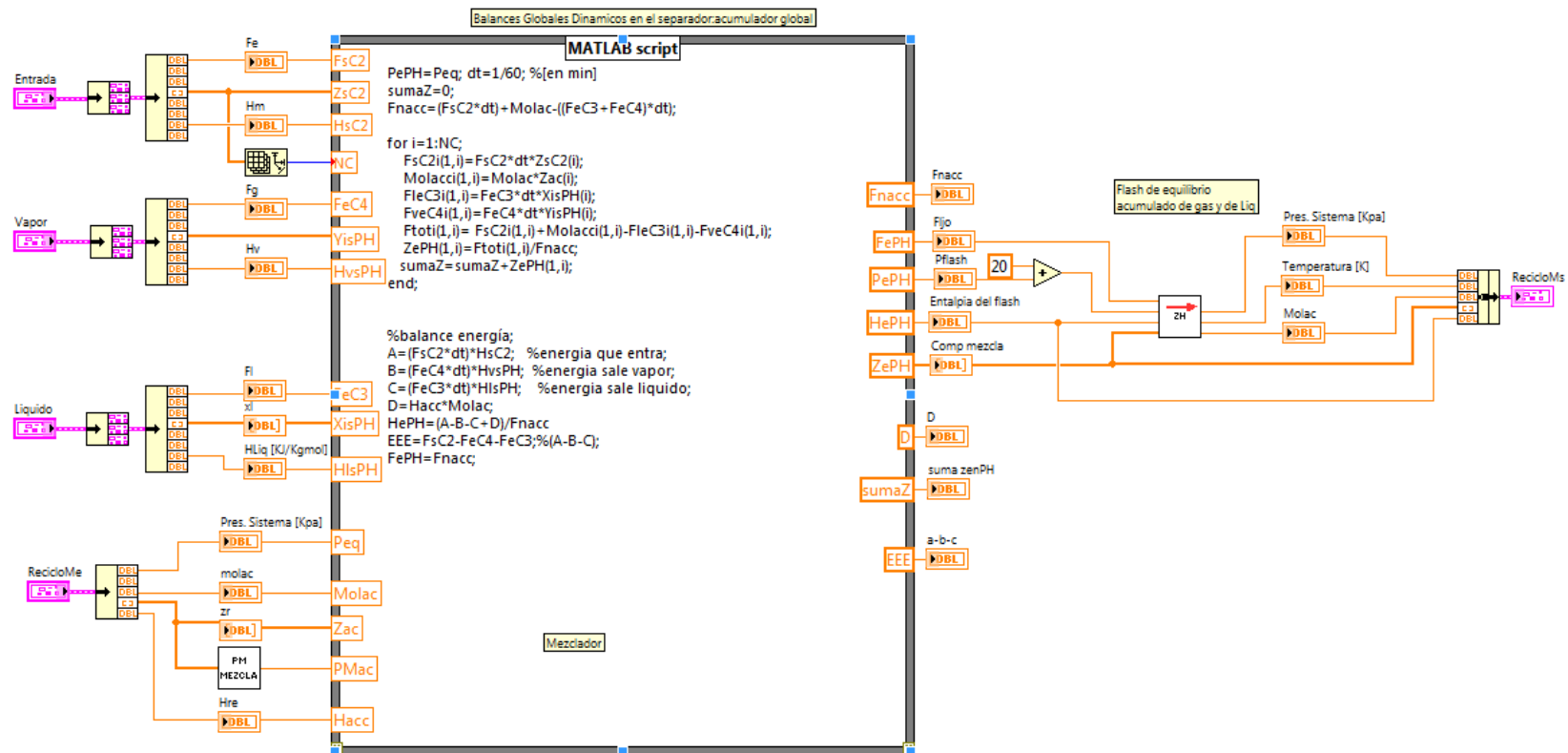


Figura.- 43 Programación en el bloque de diagrama de LabVIEW para el modulo mezclador utilizado en el estado dinámico.

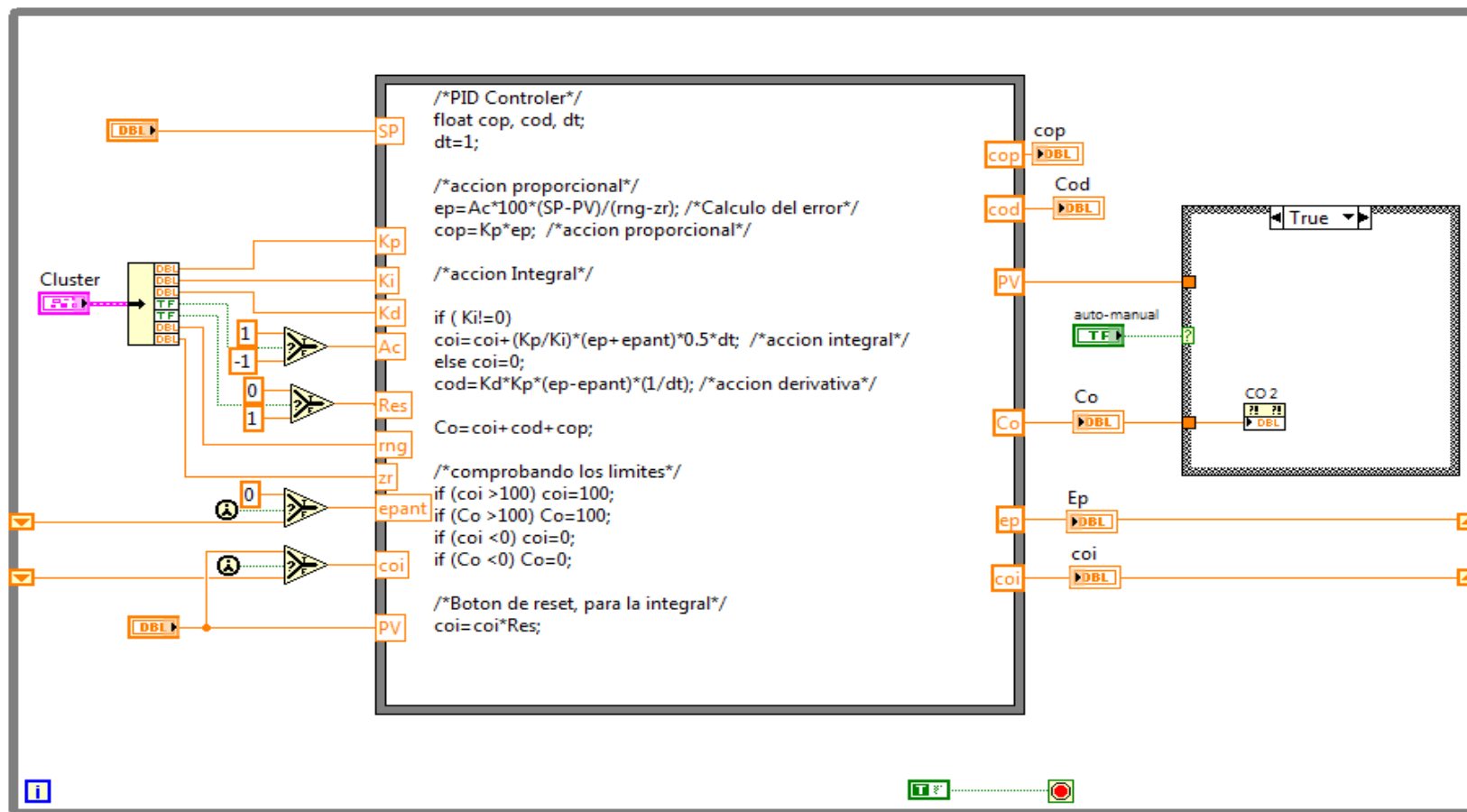


Figura.- 44 Diagrama de bloque desarrollado para el controlador.

Tabla N° 12 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (1/4).

	C1			C2			C3			C4		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	380	380,00	0,00	319,36	316,46	0,91	311,5	329,78	5,87	311,503	311,49	0,00
Temperatura (K)	286,2	285,5	0,2	283,2	281,8	0,5	282,6	281,4	0,4	282,6	281,4	0,4
Flujo (Kgmol/h)	1897,52	1898,00	0,03	1897,52	1898,00	0,03	1840,97	1820,00	1,14	56,56	77,95	37,83
Frac. de Vapor (fi)	0	0	0	0,0243	0,0373	53,22	0	0	0,0	1	1	0,0
Entalpía (KJ/Kgmol)	-154457	-153928	0,34	-154457	-153928	0	-155865	-155907	0	-108611	-107663	1
Entropía (KJ/Kgmol*C)	83,23	84,74	1,81	83,26	84,87	1,93	81,10	81,88	0,96	153,82	154,00	0,12

Tabla N° 13 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (2/4).

	C5			C6			C7			C8		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	241,50	241,00	0,21	2186,50	2205,00	0,85	2065,00	2065,00	0,00	1170	1170,00	0,00
Temperatura (K)	281,3	281,4	0,0	283,8	284,4	0,2	284,30	284,6	0,09	433,35	437,0	0,84
Flujo (Kgmol/h)	56,56	77,95	37,83	1840,97	1820,00	1,14	1818,59	1820,00	0,08	437,00	432,00	1,14
Frac. de Vapor (fi)	1	1	0,00	0	0	0,00	0	0,	0,00	0,2249	0,23	0,02
Entalpía (KJ/Kgmol)	-108611	-107637	1	-155611	-154998	0	-155900	-155000	0,58	-158688	-156083	0,00
entropía(KJ/Kgmol*C)	155,81	156,80	0,63	81,35	82,60	1,54	81,48	82,77	1,58	164,54	168,58	2,46

Tabla N° 14 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (condiciones originales) (3/4).

	C9			C10			C11			C12		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	1998,35	1998,29	0,00	1100,00	1100,00	0,00	1931,44	1931,40	0,00	1925,00	1925,00	0,00
Temperatura (K)	288,4	280,6	2,7	429,2	437,0	1,8	322,0	317,7	1,3	330,8	334,0	1,0
Flujo (Kgmol/h)	1840,97	1820,00	1,14	437,00	427,60	2,15	1840,97	1820,00	1,14	824,00	824,00	0,00
Frac. de Vapor (fi)	0,00	0,00	0,00	0,14	0,15	6,71	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
Entalpía (KJ/Kgmol)	-154980	-154371	0	-161346	-158701	2	-150035	-149375	0	-104900	-103442	1
entropía (KJ/KgmolC)	83,62	84,98	1,62	158,47	162,56	2,58	99,85	100,93	1,08	143,70	150,14	4,48

Tabla N° 15 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el primer caso (4/4).

	C13		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	1935,00	1935,00	3,75
Temperatura (K)	431,9	427,1	0,72
Flujo (Kgmol/h)	1016,00	996,04	1,79
Frac. de Vapor (fi)	0	0,00	100,00
Entalpía (KJ/Kgmol)	-152400	-149201	2,10
entropía (KJ/KgmolC)	150,70	153,27	1,62



Tabla N° 16 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (1/4).

	C1			C2			C3			C4		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	380	380,00	0,00	337,52	333,93	1,06	327,11	345,32	5,57	327,11	327,00	0,034
Temperatura (K)	288,1	285,5	0,90	285,2	283,1	0,74	284,4	282,6	0,62	284,4	282,0	0,830
Flujo (Kgmol/h)	1897,52	1898,00	0,03	1897,52	1898,00	0,03	1838,99	1842,37	0,18	58,53	55,63	4,958
Frac. de Vapor (fi)	0	0	0,0	0	0	1,97	0	0	0,00	1	1	0,0
Entalpía (KJ/Kgmol)	-154192	-153928	0,17	-154192	-153931	0,17	-155642	-155331	0,20	-108610	-107419	1,097
Entropía (KJ/KgmolC)	84,16	84,74	0,69	84,18	84,81	0,75	81,98	82,71	0,90	153,80	154,81	0,654

Tabla N° 17 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (2/4).

	C5			C6			C7			C8		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	257,11	256,60	0,20	2202,11	2020,30	8,26	2080,844	2080,50	0,02	1170	1170,00	0,00
Temperatura (K)	283,1	282,6	0,2	285,6	285,6	0,0	285,6	285,8	0,1	433,5	432,0	0,3
Flujo (Kgmol/h)	58,53	55,63	4,96	1838,99	1842,00	0,16	1838,99	1842,30	0,18	437,00	437,00	0,00
Frac. de Vapor (fi)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,2446857	0,225	8,086
Entalpía (KJ/Kgmol)	-108610	-107423	1,09	-155386,9	-154409	0,63	-155386,9	-154409	0,63	-158273	-156083	1,38
entropía (KJ/KgmolC)	155,68	156,82	0,73	82,22	83,46	1,51	82,26	83,64	1,67	165,50	168,58	1,86

Tabla N° 18 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (3/4).

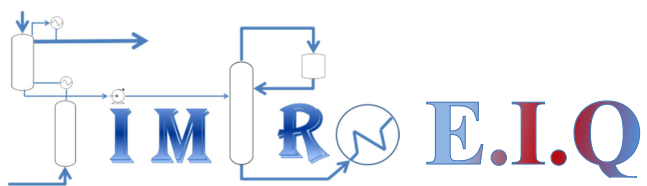
	C9			C10			C11			C12		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	2013,9535	2013,80	0,01	1100	1100,00	0,00	1947,0489	1946,93	0,01	1925,00	1925,00	0,00
Temperatura (K)	290,1	289,1	0,3	429,4	427,0	0,6	323,6	318,5	1,6	332,7	332,3	0,1
Flujo (Kgmol/h)	1838,99	1842,37	0,18	437,00	437,00	0,00	1838,99	1842,00	0,16	823,20	823,20	0,00
Frac. de Vapor (fi)	0	0	0,000	0,1597442	0,149	6,726	0	0	0,00	1,000	1,000	0,00
Entalpía (KJ/Kgmol)	-154762,3	-153792,00	0,63	-160901,6	-158679,00	1,38	-149811,9	-148851,00	0,64	-104900,00	-102797,00	2,00
Entropía	84,46	85,00	0,64	159,51	162,61	1,95	100,61	101,51	0,89	143,30	149,24	4,14

Tabla N° 19 Balance de masa y energía para el estado estacionario estudiado en el segundo caso (aumento 5% de presión en el flash) (4/4).

	C13		
	UNISIM	SimProEIQ	Error%
Presión (KPa)	1935,00	1935,00	0,00
Temperatura (K)	432,0	425,0	1,6
Flujo (Kgmol/h)	1016,00	1019,17	0,31
Frac. de Vapor (fi)	0,0	0,0	0
Entalpía (KJ/Kgmol)	-152400,00	-149062,00	2,19
Entropía	150,50	179,45	19,24

Tabla N° 20 Tabla que compara los resultados de composición obtenidos por el UNISIM Design y el desarrollado, para el flash y la columna para el segundo estado estacionario.

	Flash						Columna					
	Hysys		SIMPROEIQ		Error%		Hysys		SimProEIQ		Error%	
	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor	líquido	vapor
etano	0,0083	0,0618	0,0074	0,0738	11,38	19,33	0,0000	0,0187	0,0000	0,0177	0,00	4,95
prop	0,4183	0,7987	0,4139	0,8041	1,04	0,67	0,0024	0,9313	0,0024	0,9184	0,00	1,39
i-but	0,0706	0,0511	0,0709	0,0465	0,42	8,94	0,0935	0,0423	0,0777	0,0623	16,93	47,21
n-but	0,1219	0,0610	0,1229	0,0546	0,84	10,44	0,2144	0,0077	0,2229	0,0015	3,94	80,16
i-pent	0,0513	0,0098	0,0528	0,0080	2,96	18,34	0,0928	0,0000	0,0942	0,0000	1,50	0,00
n-pent	0,0411	0,0057	0,0415	0,0046	1,00	19,99	0,0744	0,0000	0,0748	0,0000	0,55	0,00
hex	0,2885	0,0119	0,2916	0,0082	1,06	30,87	0,5224	0,0000	0,5200	0,0000	0,46	0,00



## Manual de Usuario



## CONTENIDO

### PRIMERA PARTE

Introducción

Como fue desarrollado

Que equipos se pueden simular con SimProEIQ

### SEGUNDA PARTE

Requisitos

Como abrir el programa

Como elaborar la simulación de un proceso.

## **PRIMERA PARTE**

### **Introducción**

SimProEIQ es una herramienta computacional que permite aun usuario realizar la simulación de un proceso en estado estacionario y realizando algunos ajustes sencillos de programación se obtiene el estado no estacionario. Con la finalidad de estudiar, evaluar y analizar diversas variables de la planta.

Para realizar la simulación del proceso el usuario debe conocer las variables que definen el proceso, ya que para obtener los resultados se necesitan especificar cierta cantidad de datos en entradas y equipos, como pueden ser presión temperatura, flujos, caídas de presión, flujos de calor entre otros.

### **Como fue desarrollado**

SimProEIQ fue desarrollado utilizando un lenguaje de programación gráfico (LabVIEW), que permite comunicar y hacer uso de otros programas tales como MatLab que se usó como resolvidor de ecuaciones y Microsoft Access donde se encuentra la base de datos con propiedades físico-químicas de los componentes que usa el programa.

Para crear el SimProEIQ, se desarrollaron y programaron los modelos matemáticos que rigen a cada equipo, tanto en estado estacionario como en dinámico. Y adicionalmente, la interfaz del programa es similar a otros simuladores comerciales para que el usuario pueda entender fácilmente.

### **Equipos que pueden ser simulados con SimProEIQ**

SimProEIQ permite realizar la simulación de los siguientes equipos de procesos:

Válvulas, flash, bombas, intercambiado de calor simple, intercambiador de calor de tubo y carcaza y columnas de destilación.

---

## SEGUNDA PARTE

### Requisitos

Se debe tener instalado, LabVIEW, MatLab y Microsoft Access

### Como abrir y ejecutar el programa.

Para abrir el programa, se debe abrir la carpeta llamada SimProEIQ y dentro de ella ejecutar el archivo SimProEIQ Project.

Al abrir el proyecto se aprecia una ventana como la siguiente:

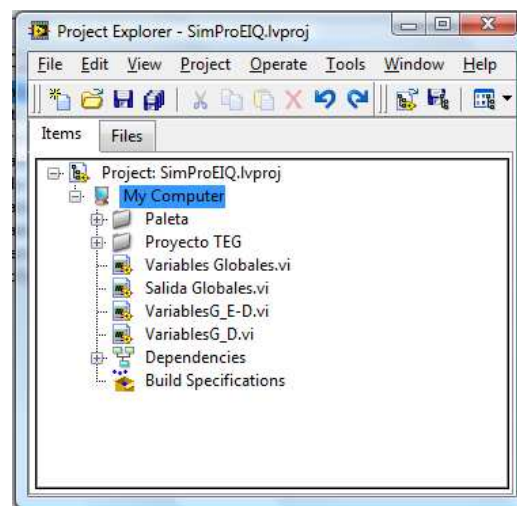


Figura # 1 Ventana Windows donde se abre el Proyecto SimProEIQ.

En esta ventana (Figura # 1) se observan una serie de carpetas y archivos; en la carpeta “Paleta” se encuentran los archivos necesarios para crear una simulación nueva y programas secundarios que calculan propiedades constantemente en el programa. La carpeta “Proyecto TEG” contiene la simulación realizada en este Trabajo Especial de Grado, tanto en estado estacionario como en dinámico.

Para crear un proceso simulado nuevo:

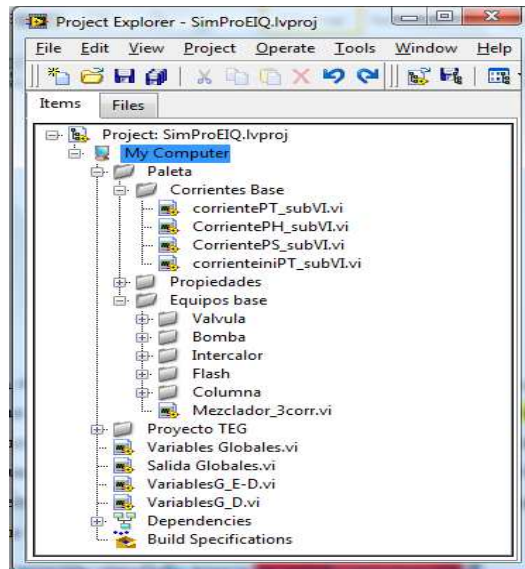


Figura # 2 Ventana Windows que refleja las corrientes base y los equipos que posee la herramienta desarrollada.

Al abrir la carpeta “Paleta”, se encuentran dos más “Equipos Base” y “Corrientes base” (ver Figura # 2). En dichas carpetas se encuentran los módulos (SubVIs) de las corrientes y de los equipos que se pueden utilizar para simular determinado proceso.

Para comenzar se debe abrir el archivo “corrienteiniPT\_subVI” y guardarlo bajo otro nombre (Ver Figura # 3).

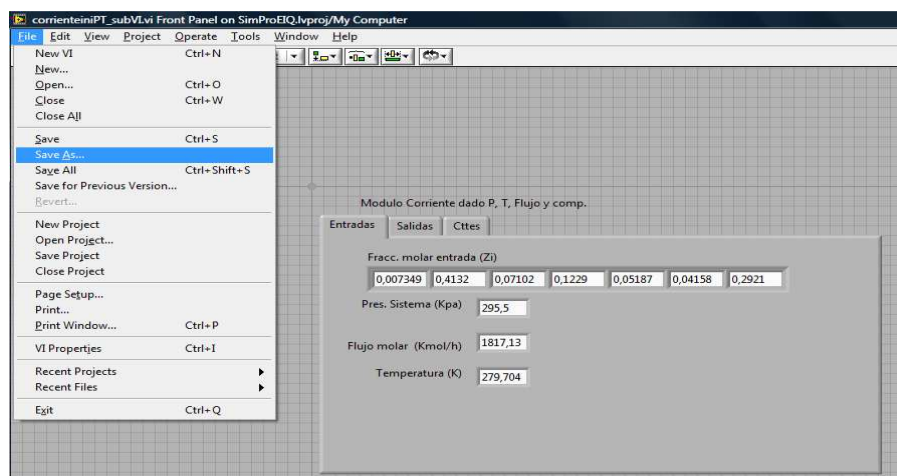


Figura # 3 Ventana de LabVIEW para salvar un programa



Esto se realiza para dejar intacto el modulo original, este paso se realiza con cada corriente y equipo que posee nuestro proceso, asignándoles nombres diferentes. Una vez que se tengan los múltiples equipos y corrientes que definen en el proceso, estos archivos deben incluirse dentro del proyecto para facilitar la organización y funcionamiento del programa. (Ver Figura # 4)

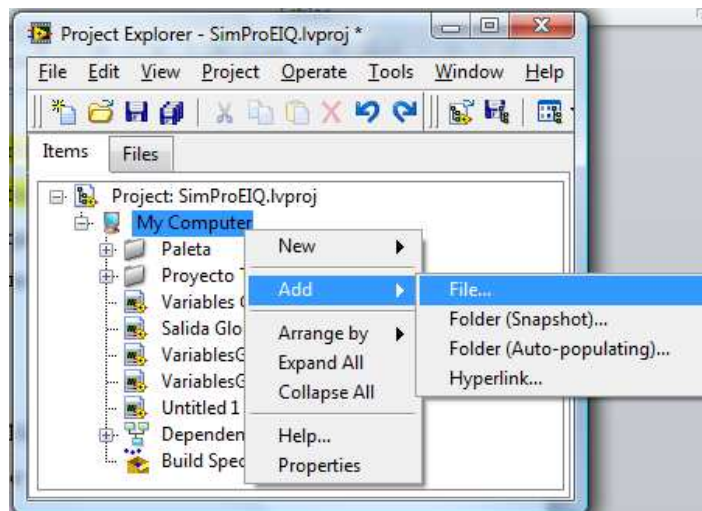


Figura # 4 Ventana LabVIEW para agregar un archivo al proyecto.

Luego se debe abrir un nuevo archivo (VI) y desde el proyecto arrastrar con el mouse (ratón) hacia el diagrama de bloque, los archivos referentes a cada corriente y equipo, de tal manera que se construya un diagrama similar al del proceso como muestra la Figura # 5.

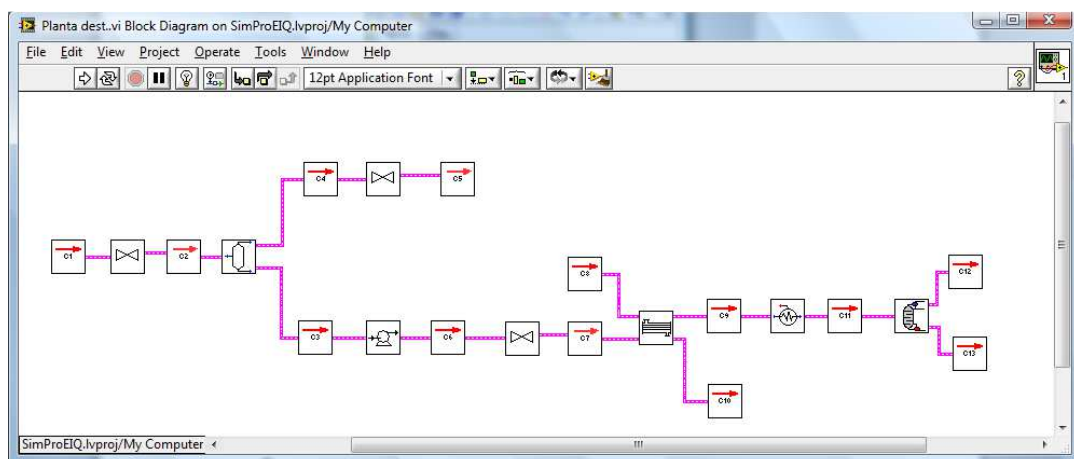


Figura # 5 Ventana LabVIEW de diagrama de bloques donde se simula el proceso.

Cada corriente y equipo tienen sus entradas y salidas correspondientes, si al unirlos el LabVIEW genera error, se debe a que la salida que resulta del equipo no corresponde con la entrada de la corriente.

Una vez realizada la configuración del bloque de diagrama simulando la planta, se procede a escribir las especificaciones de las corrientes de entradas de equipos (dimensiones, flujos de energía caída de presión, etc).

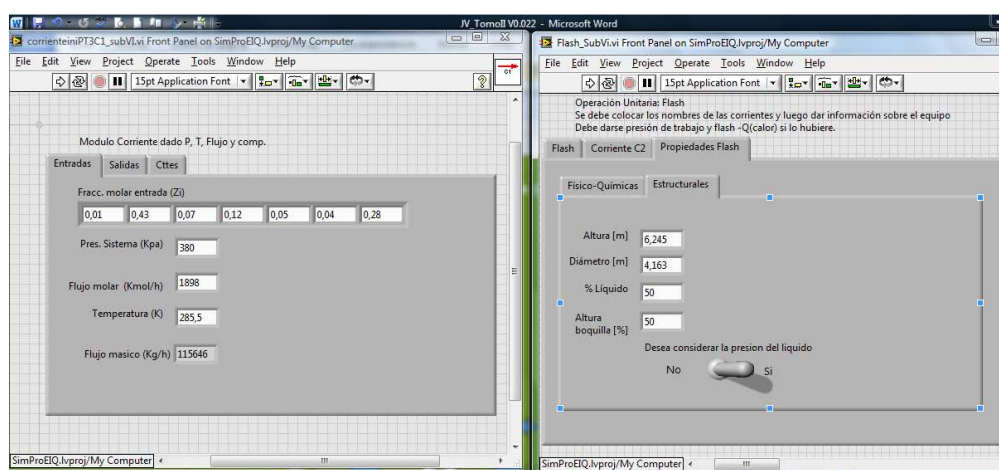


Figura # 6 Interfaz de una corriente y del flash en SimProEIQ.

Posteriormente se debe ejecutar el botón de correr “run” (ver Figura # 7), y se debe esperar que el programa se detenga por sí solo.

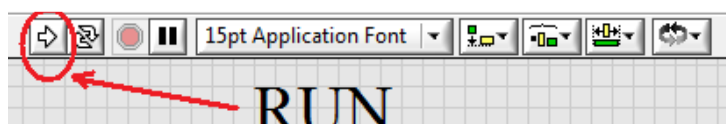


Figura # 7 Ventana de LabVIEW donde muestra las herramientas de ejecución, stop y pause

Luego para apreciar los resultados se deben abrir los subprogramas (SubVIs), y en las interfaces hay una pestaña que refleja las salidas y/o propiedades calculadas.

**Para visualizar el proceso desarrollado en este trabajo de Grado:**

Para visualizar la planta realizada en este trabajo se debe abrir el archivo “SimProEIQ.project” y abrir la carpeta TEG, donde se encuentran la versión estacionaria y dinámica del proceso simulado (Ver Figura # 8).

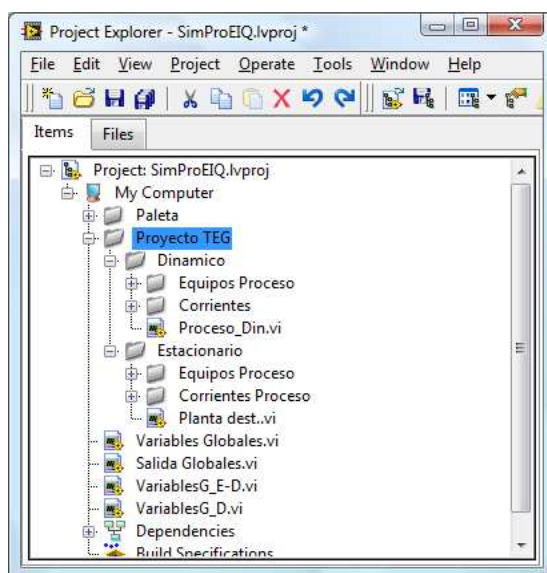





Figura # 8 Ventana LabVIEW del proyecto mostrando las carpetas del estado estacionario y dinámicas.

En cada carpeta se encuentran los archivos que abren la simulación realizada, sea en estado estacionario o dinámico, según sea el caso. Previamente antes de ejecutar el dinámico “Proceso\_Din” se recomienda ejecutar el estado estacionario “Planta dest”, para fijar y asegurar los valores de estado estacionario en la simulación dinámica.

**Para ejecutar el estado estacionario:**

Al abrir el archivo “Planta dest” y darle al botón , el programa se ejecuta por un determinado tiempo y se para al terminar de calcular, una vez que ocurre se puede entrar a las interfaces de las corrientes y equipos, donde se aprecian los resultados y características de cada uno.

### Para el estado Dinámico:

Al abrir el archivo “Proceso\_Din” y darle al botón , el programa se ejecuta de manera dinámica y no se detiene hasta que el usuario desee. Para ello debe hacer click en alguno de estos botones . STOP y PAUSE, la diferencia entre uno y otro, es que al pausar el programa, este se detiene pero las variables permanecen intactas mientras que si se para el programa la próxima vez vuelve a arrancar con las condiciones que trajo del estado estacionario.

En la siguiente figura se muestra la interfaz del estado dinámico desarrollado en este trabajo, donde se puede apreciar las distintas variables que especifican al proceso.

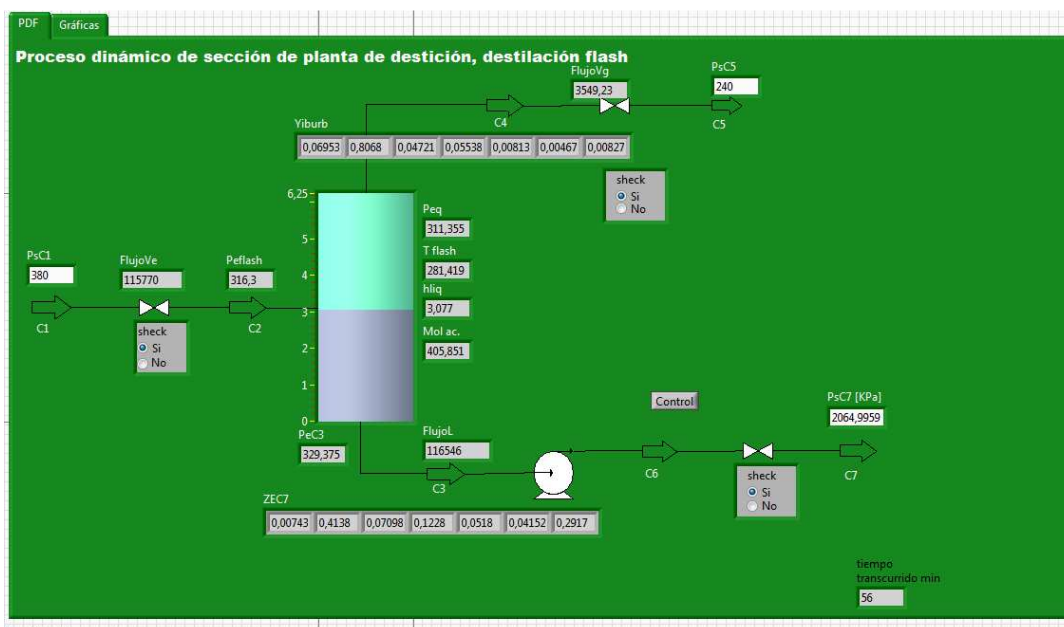


Figura # 9 Interfaz dinámica del proceso de destilación para la sección del flash. Para el estado dinámico se deben especificar las presiones de entrada(-s) y salidas, para que el programa pueda ejecutarse sin problemas y calcular el flujo y demás propiedades referentes al proceso.