

Universidad de Guayaquil



**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**TRABAJO DE TITULACION
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO**

TEMA:

**DESARROLLO DE UN SIMULADOR PARA EL DISEÑO Y
EVALUACION DE EVAPORADORES DE SIMPLE EFECTO.**

AUTORES:

**GUSTAVO MANUEL MACIAS URVINA
ISRAEL DAVID DE SEGOVIA GUIJARRO**

DIRECTOR DE TESIS

ING. HARRY REYES

GUAYAQUIL - ECUADOR

2017

AGRADECIMIENTO

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mis más profundo agradecimientos:

A Dios por todas las bendiciones que ha derramado sobre mi familia y sobre mí, por ser la guía para seguir por el camino correcto en la vida.

A mis padres por ser ese ejemplo de vida, esfuerzo y dedicación total, a mis hermanos por contar con su ayuda incondicional.

Al Ing. Harry Reyes quien me ha dirigido con paciencia, confianza y por compartir sus conocimientos a lo largo de todo este proceso.

GRACIAS.

AGRADECIMIENTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, el hace que todo lo que me propongo sea posible, es mi fortaleza para cumplir mis objetivos.

A mi madre Beatriz De Segovia, por ser mi guía, mi mejor amiga, y brindarme toda su confianza y apoyo en cada decisión que he tomado.

Al Ing. Harry Reyes, porque ha sido un buen soporte y apoyo, sin sus conocimientos no lo hubiésemos logrado con éxito y satisfacción.

A mi compañero Gustavo Macías, por su apoyo y gran aporte para culminar con satisfacción este proyecto.

A mi amiga y compañera Gabriela Pazmiño, quien ha sido parte importante en este periodo de tiempo dentro y fuera de las aulas.

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a:

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Mis Padres y abuela

Gustavo Macías, María Urbina y Piedad Andaluz, quienes me han demostrado que con la ayuda de Dios como pilar fundamental en la familia todo es posible, por ser ese ejemplo de vida y dedicación a la familia, por ayudarme a alcanzar una más de mis metas, por haberme inculcado los valores correctos para llevar una vida correcta y justa, sé que este momento es especial para ustedes como lo es para mí.

A mis hermanos Francisco y Antonella, quienes han sido mi compañía y mis mejores amigos dándome su apoyo incondicional.

DERECHOS DE AUTORÍA

Nosotros, GUSTAVO MANUEL MACIAS URVINA, ISRAEL DAVID DE SEGOVIA GUIJARRO declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual a la **UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su reglamento.

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

En mi calidad de tutor de los estudiantes **MACIAS URVINA GUSTAVO MANUEL** y **DE SEGOVIA GUIJARRO ISRAEL DAVID**, de la Facultad de Ingeniería Química y la Carrera de Ingeniería Química, nombrada por el Decano de la facultad, certifico que el estudio titulado **ING.HARRY REYES** certifica haber tutelado la tesis **“DESARROLLO DE UN SIMULADOR PARA EL DISEÑO Y EVALUACION DE EVAPORADORES DE SIMPLE EFECTO”**, para optar al grado académico de Ingeniero Químico; cumple con los requisitos académicos, científicos y formales que establece el reglamento aprobado para tal efecto.

Atentamente

Ing Harry Reyes Venegas , Msc

TUTOR

RESUMEN

La operación unitaria de evaporación, es una operación que consiste en la eliminación de un porcentaje del agua de una solución líquida para llevar la concentración de sólidos de un porcentaje a uno más alto. En la industria ecuatoriana, es un proceso utilizado en ingenios azucareros, procesos de evaporación de leche, entre otros.

En este trabajo, se hace una descripción monográfica del proceso de evaporación y los equipos para el mismo. Seguidamente, se hace la descripción de los procesos termodinámicos que intervienen en el proceso, para esclarecer el marco conceptual, sobre el cual se establecen las bases del proceso de simulación de la operación y su respectiva evaluación de eficiencia.

Asimismo, en este trabajo, se realizaron correlaciones para las tablas termodinámicas de vapor saturado, esto con el fin, de tener una función para determinar las condiciones termodinámicas del proceso, dada una sola propiedad.

Finalmente, establecidos todos los parámetros a evaluar se procederá a diseñar un algoritmo y correlaciones mediante herramientas informáticas para obtener las variables a evaluar y así obtener una correcta evaluación del proceso de evaporación.

Para el diseño de dicho simulador, se utilizará Visual Basic , como lenguaje de programación. Con este ambiente gráfico, se creará una interface amigable para el usuario, con los mínimos de conocimiento del proceso que se desee simular y con los conocimientos de computación adecuados, pueda utilizarlo sin dificultad alguna.

Palabras claves: Evaporador, Visual Basic, Algoritmo, Correlaciones.

ABSTRAC

The unitary evaporation operation is an operation that involves the removal of a percentage of water from a liquid solution to bring the concentration of solids from a percentage to a higher one. In the Ecuadorian industry is a process used in sugar mills, processes of evaporation of milk, among others.

In this work, is a monographic description of the evaporation process and equipment for the same. Then, is the description of thermodynamic processes that intervene in the process, to clarify the conceptual framework upon which to establish the bases of the process of simulation of the operation and their respective evaluation of efficiency.

Likewise, in this work, were made correlations for the thermodynamic tables of saturated steam, this with the purpose of having a function to determine the thermodynamic conditions of the process, given a single property.

Finally, established all them parameters to evaluate is will proceed to design an algorithm and correlations through tools computer to get them variable to evaluate and thus obtain a correct evaluation of the process of evaporation.

Visual Basic, a programming language will be used for the design of the Simulator. With this graphical environment, will create a user-friendly interface for the user, with the minimum of knowledge of the process that you want to simulate and the adequate computer skills, you can use it without difficulty.

Key words: Evaporator, Visual Basic, algorithm, correlations.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA.....	II
DERECHOS DE AUTORÍA	III
CERTIFICACIÓN DE TUTOR	IV
RESUMEN	V
ABSTRAC	VI
CAPITULO 1: LA INVESTIGACION	- 7 -
INTRODUCCION.....	- 7 -
1.1 TEMA	- 7 -
1.2 PROBLEMA.....	- 7 -
1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	- 8 -
1.4. LIMITACION DEL ESTUDIO	- 9 -
1.5 ALCANCE DEL TRABAJO.....	- 9 -
1.6. OBJETIVOS	- 9 -
1.6.1 OBJETIVO GENERAL.....	- 9 -
1.6.2 EPECIFICOS	- 10 -
1.7 IDEA A DEFENDER	- 10 -
1.8 PREGUNTAS A CONTESTAR	- 10 -
1.9 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA (BENEFICIARIOS)	- 11 -
1.10 HIPOTESIS	- 11 -
CAPITULO 2: REVISION BIBLIOGRAFICA.....	- 12 -
MARCO TEORICO	- 12 -
2.1 EVAPORACIÓN	- 12 -
2.2 TIPOS DE EVAPORADORES	- 13 -

2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPORACIÓN.....	- 13 -
2.3.1 CONCENTRACIÓN	- 14 -
2.3.2 ELEVACIÓN DEL PUNTO DE EBULLICIÓN.....	- 14 -
2.3.3 PRESIÓN Y TEMPERATURA	- 14 -
2.3.4 CAPACIDAD CALORÍFICA.....	- 15 -
2.3.5 FORMACION DE COSTRAS.....	- 15 -
2.3.6 ENSUCIAMIENTO Y FORMACION DE ESCAMAS	- 16 -
2.4 PROCESOS DE EVAPORACIÓN	- 16 -
2.4.1 EVAPORACIÓN DE EFECTO SIMPLE	- 16 -
2.5 CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN E INFORMÁTICA - SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE PROCESOS	- 18 -
2.5.1 SIMULACIÓN	- 18 -
2.6 MODELACIÓN - VARIABLES DE PROCESO	- 19 -
2.6.1 PRESIÓN Y PUNTOS DE EBULLICIÓN.....	- 19 -
2.6.2 CAPACIDADES CALORÍFICAS	- 20 -
2.6.3 COEFICIENTES TOTALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	- 20 -
2.7 METODOS NUMERICOS - REGRESIONES	- 21 -
2.7.1 REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS	- 21 -
2.7.2 REGRESIÓN POLINOMIAL	- 21 -
2.8 VALIDACIÓN DE MODELOS	- 22 -
2.9 ALGORITMOS.....	- 23 -
2.10 PARTES DE UN ALGORITMO.....	- 23 -
2.10.1 ENCABEZADO DE UN ALGORITMO	- 23 -
2.10.2 DECLARACIÓN DE VARIABLES	- 24 -
2.11 CUERPO DEL ALGORITMO.....	- 24 -
2.11.1 ESTRUCTURAS DE BUCLE	- 25 -
2.11.2 ESTRUCTURA “FOR”	- 25 -

2.11.3 ESTRUCTURA “DO”	26 -
2.11.4 ESTRUCTURA “WHILE”	26 -
2.11.4 ESTRUCTURAS CONDICIONALES	27 -
2.12 DIAGRAMA DE FLUJO	27 -
2.13 PSEUDOCÓDIGO	28 -
2.14 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN	29 -
2.14.1 LENGUAJE DE MÁQUINA	29 -
2.14.2 LENGUAJE DE BAJO NIVEL	29 -
2.14.3 LENGUAJE DE ALTO NIVEL	29 -
2.15 VISUAL BASIC	30 -
2.16 COMPILACIÓN DE PROGRAMAS.....	30 -
2.17 ARCHIVOS EJECUTABLES	30 -
CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL	32 -
3.1 METOLOGIA	32 -
3.2 RESULTADOS.....	34 -
3.3 MODELOS MATEMATICOS	34 -
3.4 DESARROLLO DEL SIMULADOR	36 -
PASO 1 DETERMINACION DE VARIABLES CONOCIDAS	37 -
PASO 2 DETERMINACION DE TEMPERATURA/ PRESION DE LA CAMARA DE EVAPORACION	37 -
PASO 3 DETERMINACION DE TEMPERATURA/ PRESION DEL VAPOR DE CALEFACCION	37 -
PASO 4 DETERMINACION DE FLUJOS DE ENTRADA/SALIDA.....	38 -
PASO 5 DETERMINACION DE FLUJO DE VAPOR DE SALIDA	38 -
PASO 6 DETERMINACION DE LA MOLALIDAD	38 -
PASO 7 DETERMINACION DE EPE	39 -
PASO 8 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE SALIDA	39 -

PASO 9 DETERMINACION DE LAS CAPACIDADES CALORIFICAS DE LOS FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA.....	- 39 -
PASO 10 DETERMINACION DE LAS ENTALPIAS DE LOS FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA.....	- 40 -
PASO 11 DETERMINACION DE LA ENTALPIA DE VAPOR SATURADO DE CALENTAMIENTO	- 40 -
PASO 12 DETERMINACION DE ENTALPIA DE VAPOR RECALENTADO ...	- 40 -
PASO 13 DETERMINACION LA ENTALPIA DE VAPOR CONDENSADO .-	- 41 -
PASO 14 DETERMINACION DEL FLUJO DE VAPOR DE CALENTAMIENTO REQUERIDO	- 41 -
PASO 15 DETERMINACION DEL CALOR TRANSFERIDO	- 41 -
PASO 16 DETERMINACION DEL AREA DEL EVAPORADOR.....	- 42 -
3.5 VALIDACION DEL ALGORITMO UTILIZADO EN EL SIMULADOR..	- 42 -
3.6 PROBLEMA DE APLICACIÓN	- 42 -
CAPÍTULO 4.....	- 52 -
4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	- 52 -
CONCLUSIONES.....	- 54 -
RECOMENDACIONES	- 55 -
Bibliografía.....	- 56 -
LISTA DE SIMBOLOS Y CONSTANTES	- 58 -
APENDICE A	- 61 -
APENDICE B	- 63 -

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- DIAGRAMA EVAPORADOR SIMPLE	- 18 -
FIGURA 2.- TIPO DE GRADOS DE REGRESIONES POLINOMIALES	- 22 -
FIGURA 3.- DERIVADAS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.....	- 22 -
FIGURA 4.- DIAGRAMA DEL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO.....	- 43 -
FIGURA 5.- DATOS INGRESADOS EN EL SIMULADOR.....	- 51 -
FIGURA 6.- RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SIMULADOR	- 51 -

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	- 34 -
TABLA 2.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN	- 35 -
TABLA 3.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENTALPIA DE VAPORIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	- 35 -
TABLA 4.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENTALPIA DE LÍQUIDO SATURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA...	- 36 -
TABLA 5.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENTALPIA DE VAPOR SATURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA-	- 36 -
TABLA 6.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y PORCENTAJE DE ERROR ENTRE MÉTODOS.....	- 53 -
TABLA 7.- VAPOR DE AGUA SATURADO	- 61 -
TABLA 8.- CONTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LOS ELEMENTOS PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDADES CALORÍFICAS A 298.15 K.....	- 62 -

TABLA 9.- COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR	
TÍPICOS DE LOS EVAPORADORES.....	- 62 -
TABLA 10.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA DE LA PRESIÓN EN FUNCIÓN DE LA	
TEMPERATURA.....	- 63 -
TABLA 11.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN	
DE LA PRESIÓN.....	- 65 -
TABLA 12.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA DE LA ENTALPIA DE	
VAPORIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	- 67 -
TABLA 13.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA DE LA ENTALPIA DE LIQUIDO	
SATURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	- 69 -
TABLA 14.- CORRELACIÓN MATEMÁTICA DE LA ENTALPIA DE VAPOR	
SATURADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	- 71 -

INDICE DE GRAFICOS

GRAFICA 1.- TEMPERATURA VS PRESIÓN.....	- 64 -
GRAFICA 2.- PRESIÓN VS TEMPERATURA.....	- 66 -
GRAFICA 3.- ENTALPIA DE VAPORIZACIÓN VS TEMPERATURA	- 68 -
GRAFICA 4.- ENTALPIA DE LÍQUIDO SATURADO VS TEMPERATURA	- 70 -
GRAFICA 5.- ENTALPIA DE VAPOR SATURADO VS TEMPERATURA.....	- 72 -

CAPITULO 1: LA INVESTIGACION

INTRODUCCION

1.1 TEMA

Desarrollo de un simulador para el diseño y evaluación de evaporadores de simple efecto.

1.2 PROBLEMA

El proceso de Evaporación es una operación utilizada en varios procesos industriales, ante la necesidad de obtener los flujos de vapor teóricamente necesarios para alcanzar la concentración deseada, es necesario, realizar un proceso de cálculo extenso e iterativo, de modo que resulta conveniente la utilización de un computador para asistir los cálculos. No obstante, los paquetes de software disponibles en el mercado, dependen del tipo de industria para el cual se desee la aplicación, por lo tanto, poseen correlaciones específicas para el proceso que se realizará.

Debido a esto, se notó la necesidad de un simulador, con las capacidades de calcular todas las condiciones del proceso, para distintos tipos de industria. De modo que, brinde mayor versatilidad al usuario.

A pesar del avance tecnológico que se ha vivido durante los últimos años, en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Estatal de Guayaquil, aún no se utiliza ésta como una herramienta, para el apoyo didáctico de los estudiantes, de modo que se halla la necesidad de realizar un proyecto, como iniciador de un conjunto de proyectos que integren las ventajas de la tecnología moderna en la ingeniería química.

Finalmente, como herramienta didáctica, se requiere un software que permita ahorrar tiempo en cálculos de variables de estado de evaporadores en estado estacionario, y así poder realizar un análisis preliminar de un evaporador de simple efecto teórico.

1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA.

Los procesos de evaporación son utilizados en industrias, en las cuales se desea concentrar un fluido determinado a una concentración mayor a la original. Estos procesos resultan complicados de calcular, sobre todo, cuando se introduce un sistema de evaporadores de simple efecto, Por lo tanto, se propone el diseño de un simulador de procesos de evaporación con las correlaciones, para algunas de las industrias de procesos químicos industriales más comunes en el medio nacional y para posibles soluciones ya que las correlaciones incluyen los elementos conocidos de la tabla periódica.

Para el diseño de dicho simulador, se utilizará Visual Basic, como lenguaje de programación. Con este ambiente gráfico, se creará una interface amigable para el usuario, para que un operador, con los mínimos de conocimiento del proceso que se desee simular y con los conocimientos de computación adecuados, pueda utilizarlo sin dificultad alguna.

Entre los Posibles fluidos a evaluar, se encuentra el jarabe de azúcar, utilizado en ingenios azucareros en todo el país, soluciones de hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y sal de mesa, por ser estos los más comunes en la industria nacional.

1.4. LIMITACION DEL ESTUDIO

- El equipo a evaluar en el presente proyecto de titulación se encuentra ubicado en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de Ingeniería química en la Universidad de Guayaquil.
- Se Utilizará una computadora con características que cumplan los estándares necesarios para el desarrollo de la aplicación.

1.5 ALCANCE DEL TRABAJO

Mediante este proyecto se obtendrá una evaluación del equipo de evaporación, el cual servirá para su respectivo análisis y toma de acciones para futuros cambios en el proceso.

El software elaborado podrá ser utilizado: para la respectiva evaluación del equipo de evaporación, diseño teórico de evaporadores, herramienta didáctica para el aprendizaje de la operación unitaria de evaporación.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un software para el diseño y simulación de evaporadores de simple efecto.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar los modelos y métodos matemáticos apropiados para el cálculo de las variables en los procesos de evaporación más comunes en la industria química.
- Establecer modelos matemáticos óptimos para el comportamiento de las variables de proceso que se evaluarán mediante el software.
- Diseñar el algoritmo que será utilizado por el sistema informático para el cálculo de las variables en el proceso de evaporación simple.
- Simular los procesos de evaporación y realizar una validación de eficiencia en función de cada variable analizada en el proceso.
- Exponer el software como herramienta didáctica para el estudio del proceso de evaporación en la facultad de ingeniería química de la universidad estatal de Guayaquil.

1.7 IDEA A DEFENDER

- Es posible Desarrollar un software que permita el estudio y diseño teórico de un evaporador de simple efecto, el cual podrá ser usado como herramienta para el análisis del comportamiento de las variables del proceso, requerimientos y como herramienta didáctica para el aprendizaje de la operación unitaria de evaporación.

1.8 PREGUNTAS A CONTESTAR

- ¿Cómo se elabora una correlación basada en datos experimentales?
- ¿Porque es necesario la aplicación de simuladores en el proceso de aprendizaje?

- ¿Qué variables principales influyen en el diseño de un evaporador de simple efecto?

1.9 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA (BENEFICIARIOS)

La herramienta elaborada en este proyecto permite, ahorrar tiempo en cálculos complejos que se realizan para el estudio de evaporadores y que permita la utilización de estos tiempos, para analizar la variación de las variables del proceso, a medida que cambia una variable en la alimentación o en el producto final deseado, así como el cambio de las variables de proceso, por lo cual permitirá un mayor desempeño en el aprendizaje del proceso de evaporación en los estudiantes de la facultad de ingeniería química de la universidad estatal de Guayaquil.

1.10 HIPOTESIS

La elaboración de este tipo de simuladores crea la posibilidad de diseñar teóricamente evaporadores, permite ahorrar tiempo en cálculos complejos en el planteamiento del diseño de un evaporador de simple efecto, los cuales pueden usarse también como medio didáctico en el aprendizaje de los procesos unitarios.

CAPITULO 2: REVISION BIBLIOGRAFICA

MARCO TEORICO

2.1 EVAPORACIÓN

El objetivo de la evaporación es concentrar una disolución consistente en un soluto no volátil y un disolvente volátil. En la mayor parte de las evaporaciones el disolvente es agua. La evaporación se realiza vaporizando una parte del disolvente para producir una disolución concentrada. (McCabe, Smith, & Harriott, 1999)

Esta operación se realiza por un aumento de calor en la solución, para llevarla a su temperatura de ebullición, causando la volatilización del solvente y que los solutos permanezcan en la solución, provocando un aumento en la concentración de los mismos.

La forma, en la cual se adiciona calor a un evaporador, es la condensación de vapor de agua por una superficie de contacto, de tal modo que el calor de la condensación, que es mucho mayor que el calor requerido para el aumento de temperatura de la solución, se transfiera por medio de la conducción a través de la pared y la convección en el seno del líquido.

La forma en que se transferirá la energía depende en la disposición física del equipo a utilizar, de esta cuenta, existen diversos tipos de evaporadores.

2.2 TIPOS DE EVAPORADORES

El tipo de evaporador que se deberá utilizar en el proceso, depende de la cantidad de energía que sea requerida para la operación, puesto que algunos evaporadores son más eficientes de otros.

Además de la energía requerida, existen otro tipo de condiciones relacionados al fluido a evaporar, los cuales afectarán a la selección del evaporador.

Entre dichos factores, se encuentran la formación de espumas del fluido, la corrosividad de la solución, la salinidad de los solutos, la cristalización, entre otras.

Por ejemplo, la salinidad del fluido, afecta a la selección del evaporador, dado que, si el soluto es poco soluble, este se cristalizará en las paredes del evaporador, disminuyendo así su coeficiente de transferencia de calor, con lo cual se producen elevaciones de temperatura, que puede ser fatal para un fluido termolábil.

2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPORACIÓN

La transferencia de calor es el factor simple más importante en el diseño de evaporadores, puesto que la superficie de calentamiento representa la mayor parte del costo del evaporador. El tipo de evaporador que se selecciona es el que tiene el coeficiente más alto de transferencia de calor en las condiciones operacionales deseadas. (Perry, Green, & Maloney, 2010)

Aparte de las consideraciones de transferencia de calor, la selección del tipo de evaporador apropiado para un proceso se rige por los factores fisicoquímicos del líquido y del producto, según se analizarán a continuación.

2.3.1 CONCENTRACIÓN

Este es un factor fisicoquímico muy importante en el proceso de evaporación, pues es la que determina otros dos elementos fundamentales en la transferencia de calor, como lo son la capacidad calorífica de la solución, y la elevación del punto de ebullición, puesto que, al ser el soluto no volátil, aumenta el punto de ebullición, con lo cual se requiere una energía adicional, que la necesaria para evaporar agua.

2.3.2 ELEVACIÓN DEL PUNTO DE EBULLICIÓN

Al disolverse un soluto no volátil, en un solvente, la presión de vapor del solvente disminuye. La presión de vapor de la mayor parte de las disoluciones acuosas es menor que la del agua a la misma temperatura. Por tanto, para una presión dada, la temperatura de ebullición de las disoluciones es mayor que la del agua pura. (McCabe, Smith, & Harriott, 1999)

Como consecuencia de su aumento en el punto de ebullición, la solución requerirá de más energía para que alcance una presión de vapor igual a la presión del sistema.

2.3.3 PRESIÓN Y TEMPERATURA

Son dos características muy importantes dentro de la evaporación, puesto que es la presión de operación la que determinará el punto de ebullición, por ende, la temperatura. De acuerdo al modelo experimental de Classius y Clappeyron, si disminuyéramos la presión de un sistema, su temperatura de ebullición también disminuirá, de igual forma, si aumentáramos la presión, aumentará su temperatura de ebullición y con ello la energía requerida para el proceso. Debido a esto, que se debe trabajar, con equipos de

vacío, que permitan aprovechar el vapor vivo que se alimenta al evaporador para minimizar costos.

2.3.4 CAPACIDAD CALORÍFICA

La capacidad calorífica de una masa se describe como la cantidad de energía en Joules (o BTU) requerida para aumentar un grado Celsius (o Fahrenheit) por unidad de masa, es decir por kilogramo o libra.

La capacidad calorífica del agua, a 25°C es de 4.184J/kg°C, esto quiere decir, que la energía necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de agua desde 25 a 26°C, es de 4.184 Joules.

Este concepto, es muy útil, pues nos permite definir una ecuación diferencial de balance de calor.

$$\Delta Q = m C_p \Delta T \quad \text{ec.1}$$

Aunque es una ecuación sumamente sencilla, establece una interrogante, el diferencial de calor depende del diferencial de temperatura. Puede haber una de las propiedades que no son constantes con respecto de la temperatura, y obviamente la masa puede variar con el tiempo, mas no con la temperatura. Así que, esto sienta la idea de que la capacidad calorífica de una sustancia puede variar con la temperatura.

2.3.5 FORMACION DE COSTRAS

Algunas disoluciones depositan costras sobre las superficies de contacto. En estos casos el coeficiente global disminuye progresivamente hasta que llega un momento en que es

preciso interrumpir la operación y limpiar los tubos. Cuando las costras son duras e insolubles, la limpieza resulta difícil y costosa. (McCabe, Smith, & Harriott, 1999)

2.3.6 ENSUCIAMIENTO Y FORMACION DE ESCAMAS

El ensuciamiento se refiere a cualquier capa o depósito de materias extrañas en una superficie de transferencia de calor. Comúnmente, esos materiales tienen baja conductividad térmica, lo que provoca una resistencia mayor a la transferencia de calor. En los equipos de procesos de transferencia de calor se producen varios tipos diferentes de ensuciamiento.

La sedimentación es la deposición de materiales finamente divididos, a partir del fluido del proceso.

La formación de escamas se debe, a la cristalización de un material cuya solubilidad, a la temperatura de la pared, es más baja que la temperatura del líquido.

Los productos de la corrosión pueden oponer una resistencia importante a la transferencia de calor. Los crecimientos biológicos, como los de algas, constituyen un problema grave en muchas corrientes de agua de enfriamiento y en la industria de la fermentación. (Perry, Green, & Maloney, 2010)

2.4 PROCESOS DE EVAPORACIÓN

2.4.1 EVAPORACIÓN DE EFECTO SIMPLE

La mayoría de evaporadores son calentados con vapor de agua que se condensa sobre tubos metálicos. Con frecuencia el líquido que hierve se encuentra a un vacío moderado, de hasta 0,05 atm absolutas. Al reducir su punto de ebullición aumenta la diferencia de

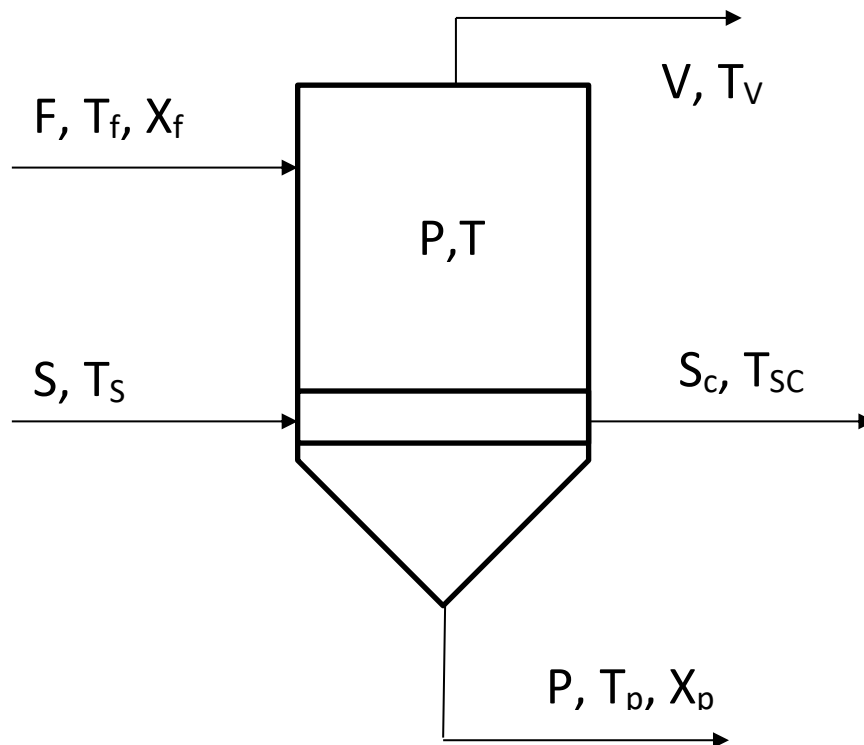
temperatura entre el vapor condensante y el líquido en ebullición y, por tanto, aumenta la velocidad de transmisión de calor en el evaporador.

Cuando se utiliza un solo evaporador, el vapor procedente del líquido en ebullición se condensa y desecha. Este método recibe el nombre de evaporación de simple efecto, y aunque es sencillo, utiliza ineficazmente el vapor. (McCabe, Smith, & Harriott, 1999)

Para mejorar el aprovechamiento de calor, se puede reutilizar el vapor extraído del evaporador, mezclándolo con el vapor vivo proveniente de la caldera, el cual, perderá un poco de su presión, pero ganará flujo másico, obteniéndose mejores rendimientos o alguna economía de vapor.

Se utilizan evaporadores de simple efecto donde la capacidad requerida sea pequeña, el vapor sea barato, el material sea tan corrosivo que se requieran materiales de construcción muy costosos o donde el vapor esté tan contaminado que no se pueda volver a utilizar. (Perry, Green, & Maloney, Manual del ingeniero químico, 2010)

Figura 1.- Diagrama Evaporador simple
Fuente: (Barreiro, 1990)



Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

2.5 CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN E INFORMÁTICA - SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE PROCESOS

2.5.1 SIMULACIÓN

La simulación de procesos puede ser definida como una técnica para evaluar en forma rápida un proceso con base a una representación del mismo, mediante modelos matemáticos. La solución de éstos se lleva a cabo por medio de programas de computadora y permite tener un mejor conocimiento del comportamiento de dicho proceso. El número de variables que aparecen en la descripción matemática de una planta de proceso química puede ser tan grande como 100,000, y el número de

ecuaciones no lineales que deben resolverse pueden ser del orden de miles, por lo tanto la única forma viable de resolver el problema es por medio de una computadora. (Martínez, Alonso, & López, 2000)

La evaporación, es un proceso que depende de muchas variables, y del cual, no existe, aún, un software que simule dicho proceso. Sin embargo, en varias industrias químicas, ya se tienen estos procesos automatizados. De igual forma, es necesario, tener un software que permita realizar un estimado de los cambios que sufriría el proceso, si se cambian algunas de las variables de proceso.

El fin de simular un proceso, nos permite, realizar estimados de factibilidad, o rentabilidad si se decide realizar un cambio al proceso.

La simulación puede llevarse a cabo mediante diversos lenguajes de programación, entre estos se encuentra el utilizado para este proyecto, Visual Basic.

2.6 MODELACIÓN - VARIABLES DE PROCESO

Ya fueron mencionados anteriormente, no obstante, ahora se dará el enfoque, en el cual serán útiles en la modelación.

2.6.1 PRESIÓN Y PUNTOS DE EBULLICIÓN

En la simulación de un proceso de evaporación, se necesitan de ciertos modelos básicos, dentro de estos encontramos el comportamiento entre el punto de ebullición con respecto a la presión de operación. Dado que las presiones, son fáciles de conocer, requeriremos de un modelo que ajuste la temperatura de saturación del agua, con la presión.

Además de esta relación, también debemos de considerar, la existente entre la temperatura del punto de ebullición y la concentración. Pues debido a las propiedades coligativas de una disolución, a medida que aumenta la concentración de los solutos no volátiles, aumenta el punto de ebullición. Y este aumento, es otra de las condiciones que se ven sujetas a la modelación.

2.6.2 CAPACIDADES CALORÍFICAS

Se utilizará el método de Kopps para la determinación de las capacidades caloríficas aproximadas. Debido a que la capacidad calorífica se verá afectada por la concentración de un soluto, la distribución de calor, no será igual, que en un líquido puro.

2.6.3 COEFICIENTES TOTALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Esta es una variable cuyo cálculo resulta complicado, dado que determina las temperaturas teóricas que tendrán cada uno de los fluidos. Por lo que es mejor, una modelación al respecto, en este caso particular, se introduce una considerable fuente de error, pero reducirla es casi tan complicado como calcular todo el sistema una vez más.

Sin embargo, para el cálculo de evaporadores, se utilizarán coeficientes típicos de los equipos, o coeficientes recomendados por la bibliografía. (ver tabla 9)

El simulador propuesto en este proyecto trabaja con evaporadores de tubos verticales largos y cortos.

2.7 METODOS NUMERICOS - REGRESIONES

2.7.1 REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS

Hay varios métodos y técnicas que sirven para ajustar una serie de datos, y pasarlos a un modelo matemático, que nos permita describir el comportamiento de los mismos, para ellos recurriremos al método de mínimos cuadrados que nos permitirán realizar la regresión de una serie de datos.

Este método fue desarrollado por LaGrange, los cuales son multiplicadores que minimizan los errores cuadráticos de una serie de datos, tomando valores de las constantes de determinados modelos. Donde los más comunes son aquellas regresiones de mínimos cuadrados para rectas, en los cuales se propone un modelo de forma lineal con una pendiente a y el intercepto b , de esta forma determinamos los errores cuadráticos, para luego proceder a realizar a derivar el error con respecto a la pendiente a y al intercepto b , con lo que hallaremos un mínimo en el error, de este punto se desprende el método, que actualmente existe en los diversos softwares que realizan la operación de mínimos cuadrados sin ninguna dificultad.

2.7.2 REGRESIÓN POLINOMIAL

Las regresiones polinomiales dependen de la relación entre las variables dependientes y las independientes que no son lineales, estas son útiles debido a que nos ayudan a explicar de manera sencilla la variación de las variables dependientes. (Seber & Wild, 1989)

La variable independiente consta de varios términos:

Figura 2.- Tipo de grados de regresiones polinomiales

Fuente: (Seber & Wild, 1989)

$$y = a + bx + cx^2 \text{ Segundo Grado}$$

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \text{ Tercer Grado}$$

$$y = a_0 + a_1x + a_1x^2 + \dots a_nx^n \text{ Ecuacion general para cualquier grado}$$

Estos al derivarse con respecto a cada uno de los coeficientes se forman un nuevo sistema de ecuaciones:

m = # pares de datos.

Figura 3.- Derivadas de las variables independientes

Fuente: (Seber & Wild, 1989)

$$S = \begin{bmatrix} am & b \sum x & c \sum x^2 & d \sum x^3 & \dots & = & \sum y \\ a \sum x & b \sum x^2 & c \sum x^3 & d \sum x^4 & \dots & = & \sum xy \\ a \sum x^2 & b \sum x^3 & c \sum x^4 & d \sum x^5 & \dots & = & \sum x^2y \\ a \sum x^3 & b \sum x^4 & c \sum x^5 & d \sum x^6 & \dots & = & \sum x^3y \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} m & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \dots \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \dots \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \dots \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2y \\ \sum x^3y \\ \dots \end{bmatrix}$$

2.8 VALIDACIÓN DE MODELOS

Esta técnica es utilizada para determinar errores, mediante la comparación de los datos obtenidos de un determinado modelo con los datos experimentalmente obtenidos.

Es importante ya que nos permite fijar un máximo de tolerancia para los errores obtenidos, los cuales serán expresados, en términos de porcentajes de error permitido. Si la desviación obtenida es menor que la tolerancia, se establece que el modelo es válido,

en caso contrario, no será válido y se deberá proponer otro modelo que ajuste con mayor exactitud los datos experimentales.

2.9 ALGORITMOS

Un algoritmo es un método para la resolución de un problema mediante pasos sucesivos y organizados en secuencia lógica. Aunque este es un concepto más sencillo de algoritmos, se debe de hacer más específico cuando se trabaja con lenguajes de programación, debido a que existen los algoritmos de tipo estructurado y los de tipo secuencial.

Los algoritmos secuenciales consisten en pasos numerados donde las tareas se suceden de tal forma que la entrada de una es la salida de la anterior, así sucesivamente hasta el final del proceso.

Los algoritmos de tipo estructurado, son los más comunes en la programación actual. Aunque se dice que la programación actual es orientada a objetos, no se pierde la estructura de los algoritmos.

2.10 PARTES DE UN ALGORITMO

Un algoritmo se compone de varias partes, por lo general son, un encabezado, una sección de declaración de variables y el cuerpo del algoritmo en general.

2.10.1 ENCABEZADO DE UN ALGORITMO

Todo algoritmo tiene como cabecera la palabra reservada: algoritmo, seguida de un identificador que describe adecuadamente el programa. En general, el nombre debe tener ciertas restricciones, como:

- No puede contener palabras reservadas,
- No puede contener caracteres especiales, solo letras y números,
- No puede sobrepasar los 256 caracteres.

2.10.2 DECLARACIÓN DE VARIABLES

En esta parte del algoritmo se declara el nombre y tipos de variables que se utilizarán en el algoritmo, de momento nos reservaremos a los tipos más generales, aunque al final de este texto, analizaremos el tipo registro. Los tipos de variables más usuales son:

- **Carácter:** Maneja todos los caracteres en forma de palabra, aunque la variable se llene con un valor numérico no es posible operarlo, ya que estos se representan encerrados entre comillas.

Entero: Subconjunto finito de números enteros, no tiene componentes fraccionarios ni decimales y suelen estar dentro de un rango.

- **Real:** Son números fraccionarios, incluyen punto decimal.

- **Lógico:** o booleano son aquellos que solo pueden tener dos valores (cierto o falso) y representan el resultado de una comparación entre otros datos.

2.11 CUERPO DEL ALGORITMO

Es la secuencia de pasos que permite llegar al objetivo del algoritmo, para esta sección debemos extendernos en las diversas estructuras de los algoritmos, y a su vez contiene otras dos secciones como lo son el bloque de declaraciones y el bloque de instrucciones.

- **Bloque de declaraciones:** aquí se definen o declaran las constantes con nombre, los tipos de datos definidos por el usuario y las variables.
- **Bloque de instrucciones:** contiene las acciones necesarias a ejecutar para la obtención de resultados. (Joyanes, 1996)

2.11.1 ESTRUCTURAS DE BUCLE

Las estructuras de bucles permiten ejecutar una o varias líneas de código de forma repetitiva, hasta que una condición sea verdad, una condición sea falso, un número de veces especificado o una vez para cada objeto de la colección.

2.11.2 ESTRUCTURA “FOR”

La estructura “para” ejecuta un bucle un número fijo de veces. Esta utiliza una variable que controla el bucle, también conocida como contador, para seguir el número de repeticiones. Se debe especificar los valores de inicio y fin de este contador, y su estructura o sintaxis es:

“For” i=1 hasta i=n hacer:

Operaciones requeridas

End for

De esta manera, el usuario le asignará un valor numérico definido a n. Si el usuario ingresa dicho valor, será requerido realizar una validación antes de que se ejecute el ciclo, para este proceso se usarán estructuras de decisión, las cuales se analizarán más adelante. (Microsoft, Developer Network, 2016)

2.11.3 ESTRUCTURA “DO”

Esta estructura a diferencia de la estructura bucle, mantiene un ciclo hasta que se cambie una condición y sea cumplida, por lo cual, se debe tener cuidado de no crear un bucle infinito (que la condición nunca pueda ser satisfecha). Para esto, se establecerá una salida del bucle.

Su sintaxis es la siguiente:

Do:

Operaciones requeridas:

Hasta que [condición]

Este tipo de estructura, tiene una diferencia básica con la anterior, puesto que esta no tiene un número definido de bucles, sino que depende del usuario. (Microsoft, Developer Network, 2016)

2.11.4 ESTRUCTURA “WHILE”

Esta estructura, es parecida a la anterior, debido a que el número de bucles depende de una determinada condición, su diferencia radica, en que el bucle se detiene si la condición de “para” se cumple a la primera, puesto que la comprobación se encuentra al final. (Microsoft, Developer Network, 2016)

La sintaxis de esta estructura es la siguiente:

While [Condición]:

operaciones requeridas:

Next

2.11.4 ESTRUCTURAS CONDICIONALES

Este tipo de estructuras, son usados en todos los operadores matemáticos y lógicos. Estas son SI, Y, O, Y NO, O NO. Son sencillos de analizar ya que están basadas en la lógica básica.

Su sintaxis es:

Si [condición] entonces:

operaciones requeridas:

De lo contrario:

operaciones requeridas:

Fin Si

En varios casos es posible realizar árboles de decisión, condiciones múltiples, así como condiciones anidadas. (Microsoft, Developer Network, 2016)

2.12 DIAGRAMA DE FLUJO

Un diagrama de flujo es la representación gráfica de algoritmos, que se da cuando varios símbolos, los cuales nos indicaran diferentes procesos en la computadora, se

relacionan entre ellos mediante líneas que nos indican el orden en que se ejecutarán los procesos.

En otras palabras, nos podemos referir a un diagrama de flujo como la representación en forma gráfica de cómo se deben de realizar los pasos en la computadora para producir resultados.

El diagrama de flujo utiliza unos símbolos normalizados, con los pasos del algoritmo escritos en el símbolo adecuado y los símbolos unidos por flechas, denominadas líneas de flujo, que indican el orden en que los pasos deben ser ejecutados. (Joyanes, 1996)

2.13 PSEUDOCÓDIGO

El pseudocódigo es un lenguaje de especificación de algoritmos que utiliza palabras reservadas, y que exige el uso de sangría en el margen izquierdo de algunas líneas. El pseudocódigo fue creado para superar las desventajas de los diagramas de flujos, los cuales son lentos en su creación y difíciles de modificar sin un nuevo redibujo. (Joyanes, 1996)

El pseudocódigo fue pensado de forma que facilite a las personas el entendimiento de un algoritmo, con ello se puede omitir detalles irrelevantes que son necesarios en una implementación. Los programadores utilizan distintas convenciones, las cuales su sintaxis están basadas en lenguajes de programación específicos. Sin embargo, el pseudocódigo, es comprensible sin la necesidad de conocer un entorno de programación específico.

2.14 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

Dado que el diagrama de flujo o el pseudocódigo no son comprensibles por la computadora, es necesario que el algoritmo se exprese en un formato conocido como programa. Los lenguajes usados para la elaboración de programas de computadoras son los lenguajes de programación. El proceso de traducir un algoritmo en pseudocódigo a un lenguaje de programación se conoce como codificación. El código fuente es el algoritmo ya transcrito en un lenguaje de programación. (Joyanes, 2006)

2.14.1 LENGUAJE DE MÁQUINA

El lenguaje de máquina es el único que entiende directamente la computadora, este usa el alfabeto binario el cual consta de dos símbolos 1 y 0, denominados bits. Este es el lenguaje original de la computadora y es generado por el "software", mas no por el programador.

2.14.2 LENGUAJE DE BAJO NIVEL

Es un lenguaje de programación se asemeja al lenguaje de máquina. Es difícil de entender por parte de las personas y requiere que los programadores codifiquen las instrucciones con muchos detalles.

2.14.3 LENGUAJE DE ALTO NIVEL

Son aquellos que se asemejan al lenguaje humano. Es más fácil escribir programas en este lenguaje, pero luego deben ser traducidos para que la computadora los entienda.

2.15 VISUAL BASIC

Este es uno de los lenguajes de programación más utilizados actualmente, que si bien no cumple con ciertos aspectos como lo son: herencia, encapsulado y polimorfismo, nos permite realizar la programación de una forma más sencilla debido que la mayoría de sus funciones están automatizados. Y sus controles vienen con cierta cantidad de propiedades, fáciles de modificar.

El entorno visual facilita el desarrollo y la creación de aplicaciones, una gran ventaja que tiene es que es compatible con el sistema de Windows, el cual abunda en el mercado y sus costos son accesibles.

2.16 COMPILACIÓN DE PROGRAMAS

Un compilador es un programa que traduce a lenguaje de maquina los programas escritos en lenguaje de alto nivel. Esta traducción se realiza en una sola operación llamada compilación del programa, es decir, que se traducen todas las instrucciones del programa en un solo bloque. (Joyanes, 2006)

El trabajo del compilador es efectuado en los ficheros unidad de compilación o módulo, en estos se añaden los ficheros de códigos fuentes o #include, a los cuales se les suprime la línea de correspondencia pasándolos por un preprocesador.

2.17 ARCHIVOS EJECUTABLES

El programa compilado y depurado (eliminación de los errores en el código fuente) es conocido como programa o archivo ejecutable, porque lo puede ejecutar directamente y cuantas veces se desee. Únicamente deberá volver a ser compilado en el caso de que se modifique alguna instrucción del programa. Tienen como extensión .EXE que significa

executable en inglés. Estos archivos, poseen la ventaja que no requieren un programa adicional para cargarse, más que el sistema operativo. (Joyanes, 2006)

CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 METOLOGIA

Gracias a las herramientas tecnológicas en nuestros días es posible realizar nuestro trabajo de investigación, la cual representa como una pieza fundamental al momento de ingresar los datos y ejecutar el programa. En esta investigación y desarrollo, se utilizó un ordenador personal, el mismo que fue equipado con los programas de programación como Visual Basic.

Las tareas realizadas en el ordenador fueron las siguientes:

- 1.- Instalación del programa de simulación del evaporador.
- 2.- La compilación de los archivos ejecutables.
- 3.- La grabación del programa en discos para su instalación.

Los recursos humanos usados, se realizaron pruebas con una cantidad variada de usuarios, con el fin de buscar posibles errores, estos fueron estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil.

Para el desarrollo del proyecto, se explicaron las definiciones conceptuales y teóricas del proceso, exponiendo el problema y las variables a encontrar, de esta manera el usuario, procede a la digitalización de los datos en el programa. El programa se ajustó a las necesidades de los problemas generales que tiene el proceso de evaporación, debido a que no es posible obtener todas las variables del mismo.

Luego de definir el proceso, se empezó a buscar los algoritmos de los cálculos, estos se encuentran disponible en la bibliografía. Permitiendo obtener los cálculos de las variables fijadas en el proceso ya que son algoritmos de carácter general.

Las variables fijadas y los algoritmos seleccionados, nos permiten realizar las correlaciones y las modelaciones del proceso. Procediendo a realizar la modelación matemática del mismo. Sin embargo, algunos de los datos de las variables no podían ser calculados y fue necesario el uso de los datos tabulados en la bibliografía, los cuales fueron correlacionados con ejercicios similares de evaporación.

Una vez encontrado el algoritmo de cálculo generalizado, se procede a hacer la traducción a pseudocódigo, el cual luego es pasado a una plataforma de programación, que nos permitirá trabajar con él a nivel gráfico, de esta forma su uso para el usuario es más sencillo.

Una vez se hayan probado y validado los resultados obtenidos, mediante las subrutinas el programa queda validado, de esta forma se analizan los algoritmos generales evitando problemas, los mismos que se verifican que estén correctos con los problemas hallados en la bibliografía.

De esta manera sencilla funciona el software, a este se le realizaran las pruebas respectivas, analizando su funcionabilidad y verificando que sea un programa de fácil comprensión, haciendo de su uso lo más sencillo posible sin necesidad que el usuario tenga conocimientos avanzados de informática.

3.2 RESULTADOS

3.3 MODELOS MATEMATICOS

Con valores experimentales de las tablas termodinámicas del vapor de agua, se aplicó el método de regresión polinomial para obtener una relación entre las siguientes variables.

Tabla 1.- Correlación matemática para la determinación de la Presión en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Presion (KPa)
INTERVALO	FORMULA
0 - 50	$y = 7E-05x^3 - 0,0002x^2 + 0,0625x + 0,5743$
50 - 75	$y = 0,0198x^2 - 1,4401x + 34,932$
75 - 100	$y = 0,0398x^2 - 4,4801x + 150,65$
100 - 150	$y = 0,0904x^2 - 15,238x + 723,75$
150 - 200	$y = 0,1967x^2 - 47,467x + 3174,3$
200 - 250	$y = 0,3458x^2 - 107,39x + 9208$
250 - 300	$y = 0,5368x^2 - 203,23x + 21246$
300 - 350	$y = 0,8127x^2 - 369,97x + 46453$
350 - 374,15	$y = 1,2395x^2 - 666,57x + 98003$

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 2.- Correlación matemática para la determinación de la temperatura en función de la presión

PRESION (KPa)	Temperatura (°C)
INTERVALO	FORMULA
0,657 - 3,166	$y = 1,0286x^3 - 8,2928x^2 + 28,417x - 14,304$
3,166 - 12,34	$y = 0,0149x^3 - 0,5061x^2 + 7,5777x + 5,752$
12,34 - 38,55	$y = 0,0004x^3 - 0,0507x^2 + 2,5887x + 25,03$
38,55 - 101,33	$y = -0,0025x^2 + 0,7396x + 50,475$
101,33 - 476	$y = -0,0002x^2 + 0,2489x + 78,268$
476 - 1554,9	$y = -2E-05x^2 + 0,0844x + 114,99$
1554,9 - 3977,6	$y = -3E-06x^2 + 0,037x + 150,28$
3977,6 - 8592,7	$y = -7E-07x^2 + 0,0192x + 184,49$
8592,7 - 16535,1	$y = -2E-07x^2 + 0,0113x + 217,79$
16535,1 - 22120	$y = -1E-07x^2 + 0,0081x + 242,48$

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 3.- Correlación matemática para la determinación de la entalpia de vaporización en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Entalpia de vaporizacion (KJ/Kg)
Intervalo	Formula
0 - 100	$y = -0,0014x^2 - 2,2893x + 2501$
102 - 200	$y = -0,0062x^2 - 1,2953x + 2447,7$
202 - 300	$y = -0,017x^2 + 3,2685x + 1963,2$
302 - 350	$y = -0,0706x^2 + 35,87x - 3007,3$
350 - 370	$y = -0,532x^2 + 362,04x - 60658$

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 4.- Correlación matemática para la determinación de la entalpia de líquido saturado en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Entalpia de líquido saturado (KJ/Kg)
Intervalo	Formula
0 - 100	$y = 4,1866x + 0,0347$
100 - 200	$y = 0,0014x^2 + 3,898x + 15,221$
200 - 300	$y = 0,0051x^2 + 2,334x + 181,11$
300 - 350	$y = 0,0229x^2 - 8,3801x + 1802,7$
350 - 370	$y = 0,1711x^2 - 112,64x + 20138$

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 5.- Correlación matemática para la determinación de la entalpia de vapor saturado en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Entalpia de vapor saturado (KJ/Kg)
Intervalo	Formula
0 - 100	$y = -0,0014x^2 + 1,8906x + 2501,1$
100 - 200	$y = -0,00001x^3 + 0,0016x^2 + 1,6516x + 2508,6$
200 - 300	$y = -0,00005x^3 + 0,0226x^2 - 3,0124x + 2854,8$
300 - 350	$y = -0,0005x^3 + 0,4627x^2 - 138,88x + 16850$
350 - 370	$y = -0,0136x^3 + 14,381x^2 - 5080,5x + 601713$

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

En el apéndice B se puede observar con mayor detalle dicho calculo. (Barreiro, 1990)

Para las correlaciones mencionadas en la sección anterior las cuales se utilizarán para predecir las propiedades termodinámicas del vapor de agua, se determina que estadísticamente, proporcionan datos confiables de acuerdo a una distribución normal.

3.4 DESARROLLO DEL SIMULADOR

En los pasos que se muestran a continuación se describe el algoritmo que se diseñó para llevar a cabo la simulación de un proceso típico de evaporación de simple efecto.

PASO 1 DETERMINACION DE VARIABLES CONOCIDAS

Determinar las variables conocidas del problema que se pretende resolver con el simulador, las cuales generalmente suelen ser las siguientes:

- Flujo másico de la alimentación.
- Concentración del líquido diluido
- Concentración del líquido concentrado
- Presión en el espacio interior del evaporador
- Presión del vapor de calefacción
- Temperatura de ingreso del líquido diluido (alimentación)
- Coeficiente de transferencia de calor

PASO 2 DETERMINACION DE TEMPERATURA/ PRESION DE LA CAMARA DE EVAPORACION

Utilizando la Presión interna del equipo se obtiene la temperatura de saturación del vapor. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 2. (Barreiro, 1990)

PASO 3 DETERMINACION DE TEMPERATURA/ PRESION DEL VAPOR DE CALEFACCION

Utilizando la Presión del vapor de calentamiento del equipo se obtiene la temperatura de saturación del vapor. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 2. (Barreiro, 1990)

PASO 4 DETERMINACION DE FLUJOS DE ENTRADA/SALIDA

Se procede a calcular el flujo Másico de salida de acuerdo a la ecuación 3, mediante un balance de materia global sobre todo el sistema: (Felder&Rousseau, 2004)

$$F + S = V + P + Sc \quad \text{ec.3}$$

Dado que $S = Sc$, entonces:

$$F = V + P \quad \text{ec.4}$$

Luego se elabora un balance en función del soluto:

$$F * X_f = V * X_v + P * X_p \quad \text{ec.5}$$

El porcentaje de soluto del vapor producido es igual a cero por lo tanto la ecuación se reduce a:

$$F * X_f = P * X_p \quad \text{ec.6}$$

PASO 5 DETERMINACION DE FLUJO DE VAPOR DE SALIDA

Mediante el flujo de salida del producto concentrado y el flujo de entrada de la alimentación se calcula el flujo de vapor de salida. (Felder&Rousseau, 2004)

$$V = F - P \quad \text{ec.7}$$

PASO 6 DETERMINACION DE LA MOLALIDAD

Con el valor de la concentración del líquido concentrado se calcula la molalidad del líquido concentrado. En caso de conocerse el valor de EPE ir directamente al paso 8. (Barreiro, 1990) (Felder&Rousseau, 2004)

$$m = \frac{\text{gramos de soluto}}{\text{peso molecular del soluto}} \quad \text{ec.8}$$

PASO 7 DETERMINACION DE EPE

Debido a la complejidad en los cálculos para la determinación de la elevación del punto de ebullición se utilizará el método termodinámico, el cual se describe con la siguiente ecuación: (Barreiro, 1990) (Perry R. M., 2010)

$$EPE = \Delta T_b = \frac{Rg * W_a * T_{ao}^2 * m}{Lv * 1000} \quad \text{ec.9}$$

PASO 8 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE SALIDA

En el caso de que exista una elevación en la temperatura de ebullición, la temperatura de salida debe de ajustarse según la ecuación: (Perry R. M., 2010)

$$T'p = Tp + EPE \quad \text{ec.10}$$

PASO 9 DETERMINACION DE LAS CAPACIDADES CALORIFICAS DE LOS FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA

En el supuesto caso de no proporcionarse el valor de la capacidad calorífica del flujo de entrada y del flujo de salida estos pueden obtenerse, mediante la siguiente ecuación: (Perry R. M., 2010)

$$Cp = X_{\text{solute}} * C_{pb} + (1 - X_{\text{solute}}) * C_{p \text{ solvente}} \quad \text{ec.11}$$

si la capacidad calorífica del soluto no es conocida, debido a la complejidad del cálculo se determina mediante el método de kopps el cual se describe con la siguiente ecuación:

$$Cps = \sum_{i=1}^n Ni * \Delta Ei \quad \text{ec.12}$$

El valor numérico de la contribución de cada elemento en el compuesto puede encontrarse en el apéndice A, el porcentaje de error promedio se encuentra entre 9-10% con respecto al valor experimental. (Perry R. M., 2010)

PASO 10 DETERMINACION DE LAS ENTALPIAS DE LOS FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA

Se procede a calcular las entalpías del líquido de entrada y del líquido concentrado de salida mediante la siguiente ecuación: (Perry R. M., 2010)

$$h = C_p (T - T_{ref}) \quad \text{ec.13}$$

PASO 11 DETERMINACION DE LA ENTALPIA DE VAPOR SATURADO DE CALENTAMIENTO

Utilizando la temperatura del vapor de calentamiento se obtiene la entalpía del vapor saturado de calentamiento. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 3. (Perry R. M., 2010)

PASO 12 DETERMINACION DE LA ENTALPIA DE VAPOR RECALENTADO

Utilizando la temperatura del vapor producido se obtiene la entalpía del vapor recalentado. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 5.

PASO 13 DETERMINACION DE LA ENTALPIA DE VAPOR CONDENSADO

Utilizando la temperatura del vapor de calentamiento se obtiene la entalpia del vapor de agua condensado. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 4. (Perry R. M., 2010)

PASO 14 DETERMINACION DEL FLUJO DE VAPOR DE CALENTAMIENTO REQUERIDO

Con los valores de las diferentes entalpias obtenidas en el balance de energía y los valores de los flujos obtenidos en el balance de materia, se calcula el flujo de vapor de calentamiento requerido por el evaporador para realizar el proceso mediante la siguiente ecuación: (Perry R. M., 2010)

$$F * hf + S * hs = V * hv + P * hp + Sc * hsc \quad \text{ec.14}$$

$$S = \frac{P*hp+V*hv-F*hf}{(hs-hsc)} \quad \text{ec.15}$$

PASO 15 DETERMINACION DEL CALOR TRANSFERIDO

Con el valor obtenido del flujo de vapor requerido y la diferencia de entalpia entre el vapor de calentamiento y el condensado se determina el calor transferido en el proceso mediante la siguiente ecuación: (Perry R. M., 2010)

$$Q = S(hs - hsc) \quad \text{ec.16}$$

PASO 16 DETERMINACION DEL AREA DEL EVAPORADOR

Con el valor del calor transferido, el coeficiente de transferencia de calor (ver Apéndice A) y la diferencia de temperaturas entre el flujo de salida y el vapor de calentamiento se calcula el área del evaporador mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} \quad \text{ec.17}$$

3.5 VALIDACION DEL ALGORITMO UTILIZADO EN EL SIMULADOR

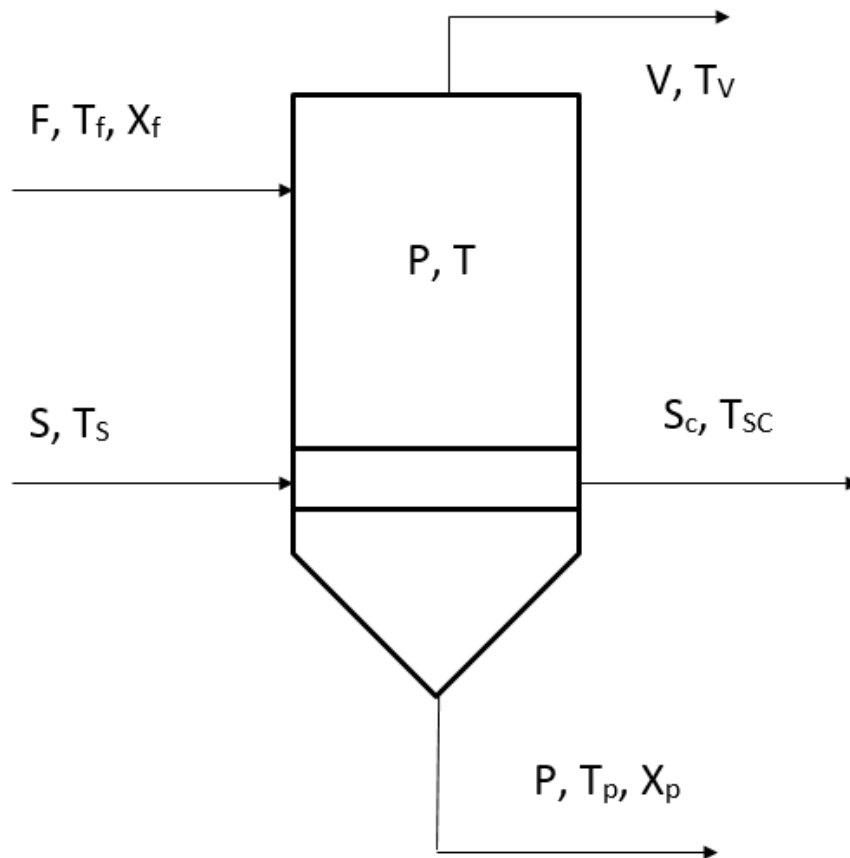
Para la validación de los modelos de los modelos propuestos en este trabajo, se realizó un análisis de los porcentajes de error entre los datos proporcionados por los modelos propuestos y de los datos tabulados en la bibliografía (ver apéndice B), de igual forma la validación del algoritmo mencionado en apartados anterior se analiza mediante la resolución, por medio del simulador, de un problema típico de evaporación de simple efecto, lo cual se detalla en la siguiente sección. (Perry R. M., 2010)

3.6 PROBLEMA DE APLICACIÓN

Un evaporador continuo de efecto simple concentra 10000 kg/h de una solución de cloruro de sodio al 1% en peso que entra a 40°C, hasta una concentración final de 8% en peso. El espacio del evaporador está a 102 KPa absoluta y el vapor de agua que se introduce está saturado a 140 KPa. El coeficiente total de transferencias de calor U es de 1700 W/m²K. Calcúlense las cantidades de vapor y de líquido como productos, así como el área de transferencia de calor que se requiere. Nota: Calcular EPE basándose en el método termodinámico. (Barreiro, 1990) Para el problema propuesto se utiliza el coeficiente de transferencia de calor para evaporadores de tubos verticales largos, aunque el simulador también puede trabajar con evaporadores de tubos verticales cortos.

Figura 4.- Diagrama del evaporador de simple efecto

Fuente: (Barreiro, 1990)



Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

PASO 1

Determinar las variables conocidas del problema:

- Flujo másico de la alimentación

$$F = 10000 \text{ Kg/h}$$

- Concentración del líquido diluido

$$x_f = 0,01$$

- Concentración del líquido concentrado

$$x_p = 0,08$$

- Presión en el espacio interior del evaporador

$$P_{camara \text{ evap}} = 102 \text{ KPa}$$

- Presión del vapor de calefacción

$$P_s = 140 \text{ KPa}$$

- Temperatura de ingreso del líquido diluido (alimentación)

$$T_f = 40^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor

$$U = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$$

PASO 2

Utilizando la Presión interna del equipo se obtiene la temperatura de saturación del vapor. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 2. Se obtiene una temperatura de saturación de 100.18°C.

PASO 3

Utilizando la Presión del vapor de calentamiento del equipo se obtiene la temperatura de saturación del vapor. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 2. Se obtiene una temperatura de saturación de 109.30 °C.

PASO 4

Se procede a calcular el flujo Másico de salida de acuerdo a la ecuación 3, mediante un balance de materia global sobre todo el sistema:

$$F + S = V + P + Sc \quad \text{ec.3}$$

Dado que $S = Sc$, entonces:

$$F = V + P \quad \text{ec.4}$$

Luego se elabora un balance en función del soluto:

$$F * X_f = V * X_v + P * X_p \quad \text{ec.5}$$

El porcentaje de soluto del vapor producido es igual a cero por lo tanto la ecuación se reduce a:

$$F * X_f = P * X_p \quad \text{ec.6}$$

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

$$10000 * 0,01 = P * 0,08$$

$$P = 1250 \text{ Kg/h}$$

PASO 5

Mediante el flujo de salida del producto concentrado y el flujo de entrada de la alimentación se calcula el flujo de vapor de salida.

$$V = F - P$$

$$V = 10000 - 1250$$

$$V = 8750 \text{ Kg/h}$$

PASO 6

Con el valor de la concentración del líquido concentrado se calcula la molalidad del líquido concentrado. En caso de conocerse el valor de EPE ir directamente al paso 8

$$m = \frac{\text{gramos de soluto}}{\text{peso molecular del soluto}}$$

$$m = \frac{(1000 * 8)/92}{59}$$

$$m = 1,47389$$

PASO 7

Debido a la complejidad en los cálculos para la determinación de la elevación del punto de ebullición se utilizará el método termodinámico, el cual se describe con la siguiente ecuación:

$$EPE = \Delta T_b = \frac{Rg * Wa * T_{ao}^2 * m}{Lv * 1000}$$

$$EPE = \Delta T_b = \frac{8,314 * 18 * 373,15^2 * 1,47389}{4,0626 \times 10^4 * 1000}$$

$$EPE = 0,755958$$

PASO 8

En el caso de que exista una elevación en la temperatura de ebullición, la temperatura de salida debe ajustarse según la ecuación:

$$T'p = Tp + EPE$$

$$T'p = 100,18 + 0,755958$$

$$T'p = 100,93596 \text{ } ^\circ\text{C}$$

PASO 9

En el supuesto caso de no proporcionarse el valor de la capacidad calorífica del flujo de entrada y del flujo de salida estos pueden obtenerse, mediante la siguiente ecuación:

$$Cp = X_{soluta} * C_{pb} + (1 - X_{soluta}) * C_{p \text{ solvente}}$$

si la capacidad calorífica del soluto no es conocida, debido a la complejidad del cálculo se determina mediante el método de kopps el cual se describe con la siguiente ecuación:

$$C_{ps} = \sum_{i=1}^n N_i * \Delta E_i$$

El valor numérico de la contribución de cada elemento en el compuesto puede encontrarse en el apéndice A, el porcentaje de error promedio se encuentra entre 9-10% con respecto al valor experimental.

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

$$C_{pb} = 1 * 26,19 + 1 * 24,69$$

$$C_{pb} = 50,88 \frac{KJ}{Kg mol K} = 0,8706 \frac{KJ}{Kg K}$$

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

La capacidad calorífica para el líquido de alimentación:

$$C_{pf} = 0,01 * 0,8706 + (1 - 0,01) * 4.1813$$

$$C_{pf} = 4,14819 \frac{KJ}{Kg K}$$

La capacidad calorífica para el líquido concentrado:

$$C_{pp} = 0,08 * 0,8706 + (1 - 0,08) * 4.1813$$

$$C_{pp} = 3.9164 \frac{KJ}{Kg K}$$

PASO 10

Se procede a calcular las entalpías del líquido de entrada y del líquido concentrado de salida mediante la siguiente ecuación:

$$h = C_p (T - T_{ref})$$

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

La entalpía del líquido de alimentación:

$$h_f = 4,14819(313,15 - 273,15) \quad h_f = 165,93 \text{ KJ/Kg}$$

La entalpía del líquido concentrado:

$$h_p = 3,9164(374,07 - 273,15) \quad h_p = 395,24 \text{ KJ/Kg}$$

PASO 11

Utilizando la temperatura del vapor de calentamiento se obtiene la entalpía del vapor saturado de calentamiento. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 3. Por medio de interpolación lineal se obtiene un valor de 2690,25 KJ/Kg

PASO 12

Utilizando la temperatura del vapor producido se obtiene la entalpía del vapor recalentado. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 5. Por medio de interpolación lineal se obtiene un valor de 2677.43 KJ/Kg.

PASO 13

Utilizando la temperatura del vapor de calentamiento se obtiene la entalpía del vapor de agua condensado. Mediante las ecuaciones propuestas las cuales son correlaciones de las tablas de vapor saturado (Ver Apéndice A). De acuerdo a la Tabla 4. Por medio de interpolación lineal se obtiene un valor de 458.36 KJ/Kg

PASO 14

Con los valores de las diferentes entalpías obtenidas en el balance de energía y los valores de los flujos obtenidos en el balance de materia, se calcula el flujo de vapor de calentamiento requerido por el evaporador para realizar el proceso mediante la siguiente ecuación:

$$F * hf + S * hs = V * hv + P * hp + Sc * hsc$$

$$S = \frac{P * hp + V * hv - F * hf}{(hs - hsc)}$$

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

$$S = \frac{(1250 * 395,24) + (8750 * 2677,43) - (10000 * 165,93)}{(2690.25 - 458.36)}$$

$$S = 9975,74 \text{ Kg/h}$$

PASO 15

Con el valor obtenido del flujo de vapor requerido y la diferencia de entalpía entre el vapor de calentamiento y el condensado se determina el calor transferido en el proceso mediante la siguiente ecuación:

$$Q = S(hs - hsc)$$

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

$$Q = 9975,74(2690.25 - 458.36)$$

$$Q = 22264754.35 \frac{KJ}{Kg} = 6184653.98 W$$

PASO 16

Con el valor del calor transferido, el coeficiente de transferencia de calor (ver Apéndice A) y la diferencia de temperaturas entre el flujo de salida y el vapor de calentamiento se calcula el área del evaporador mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T}$$

Reemplazando los valores conocidos tenemos:

$$A = \frac{6184653.98}{1700 * (109,30 - 100,92)} \quad A = 434,21 m^2$$

Luego de realizar el algoritmo paso a paso de forma escrita, se procede a realizar el mismo problema en el simulador, lo que nos da como resultado lo siguiente:

Figura 5.- Datos ingresados en el simulador

MEvS

ayuda

Componentes

Solvente: Formula Soluta: P. Molar: Cpb (KJ/Kg k): C

Camara Evaporación

Presión (KPa): Temperatura (°C):

Entrada

Flujo Masico (Kg/h): Concentración Comp. B: Temperatura (°C): Cp (KJ/Kg K): Entalpia Entrada (KJ/Kg): EPE (°C):

Diseño

Coef. Transf. (Kcal/m2h°C): Area (m2): Calor Transferido (KJ/h):

Evaporado

Flujo Masico (Kg/h): Entalpia (KJ/Kg): Temperatura (°C):

Vapor

Flujo Masico (Kg/h): Temperatura (°C): Presión (KPa): Entalpia vapor (KJ/Kg): Entalpia conds. (KJ/Kg):

Salida

Flujo Masico (Kg/h): Concentración Comp. B: Cp (KJ/Kg K): Temperatura (°C): Entalpia Salida (KJ/Kg):

Calcular

Borrar

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Figura 6.- Resultados obtenidos en el simulador

MEvS

ayuda

Componentes

Solvente: Formula Soluta: P. Molar: Cpb (KJ/Kg k): C

Camara Evaporación

Presión (KPa): Temperatura (°C):

Entrada

Flujo Masico (Kg/h): Concentración Comp. B: Temperatura (°C): Cp (KJ/Kg K): Entalpia Entrada (KJ/Kg): EPE (°C):

Diseño

Coef. Transf. (Kcal/m2h°C): Area (m2): Calor Transferido (KJ/h):

Evaporado

Flujo Masico (Kg/h): Entalpia (KJ/Kg): Temperatura (°C):

Vapor

Flujo Masico (Kg/h): Temperatura (°C): Presión (KPa): Entalpia vapor (KJ/Kg): Entalpia conds. (KJ/Kg):

Salida

Flujo Masico (Kg/h): Concentración Comp. B: Cp (KJ/Kg K): Temperatura (°C): Entalpia Salida (KJ/Kg):

Calcular

Borrar

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

CAPÍTULO 4

4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

El proceso de evaporación se utiliza ampliamente en industrias donde se desea obtener soluciones concentradas a partir de soluciones diluidas provenientes de otros procesos intermedios, ya sea para la utilización en otros procesos o para la elaboración de productos comerciales, o para la cristalización de ciertas sales de uso industrial, mediante la sustracción del solvente que generalmente es agua en el cual se encuentra disuelto el soluto o materia que se desea obtener.

En este tipo de procesos se requiere el conocimiento previo de los valores de las propiedades físicas y propiedades químicas, de los fluidos con los que se desean trabajar.

Se puede observar que la elevación del punto de ebullición depende directamente a la concentración molal del soluto y de la constante ebulloscópica del solvente, los cuales se correlacionan en el algoritmo propuesto con lo cual nos da valores aproximados a los valores experimentales de diferentes bases de datos bibliográficas.

Mediante la aplicación del algoritmo propuesto para la simulación de procesos de evaporación de simple efecto podemos observar que las variables de entrada como la capacidad calorífica, la entalpía no presentan porcentajes de error apreciable debido a las correlaciones calculadas anteriormente.

Los datos obtenidos de las tablas de vapor saturado en relación a los datos de cada correlación presentan una pequeña desviación lo cual se demuestra en el porcentaje de error de las variables como son la temperatura de la cámara de evaporación, la entalpía del vapor producido, la entalpía del vapor de calentamiento lo cual influye

despreciablemente en los cálculos de las variables de mayor importancia como son el flujo de vapor producido y el flujo de salida del evaporado.

El simulador está diseñado en función de cualquier tipo de soluciones, es decir el simulador puede integrar al cálculo cualquier fórmula que contenga cualquier elemento de la tabla periódica, así como valores tales EPE, entalpías, presión, temperatura, masas moleculares. Por lo cual, le da un valor extra al simulador ya que permite realizar comparaciones entre diferentes cálculos obtenidos mediante ajustes estacionarios de las variables del proceso, lo que lo hace útil para estudios de rendimientos y posibles ampliaciones de capacidad o estudios teóricos didácticos.

Tabla 6.- Comparación de Resultados y porcentaje de error entre métodos

	VARIABLE	BIBLIOGRAFIA	SIMULADOR	% ERROR
CAMARA DE EVAPORACION	TEMPERATURA	100,18	101,57	1,3685%
ENTRADA	CAPACIDAD CALORIFICA	4,1482	4,1482	0,0000%
	ENTALPIA	165,93	165,93	0,0000%
	EPE	0,755958	0,7632	0,9489%
SALIDA	FLUJO MASICO	1250	1250	0,0000%
	CAPACIDAD CALORIFICA	3,9164	3,9164	0,0000%
	ENTALPIA	395,24	400,8	1,3872%
	TEMPERATURA	100,92	102,33	1,3779%
VAPOR CALEFACCION	FLUJO MASICO	9975,74	9977,32	0,0158%
	ENTALPIA	2690,25	2695	0,1763%
	TEMPERATURA	109,3	109,19	0,1006%
CONDENSADO	ENTALPIA	458,36	457,55	0,1767%
VAPOR PRODUCIDO	FLUJO MASICO	8750	8750	0,0000%
	ENTALPIA	2677,43	2683,66	0,2321%
	TEMPERATURA	100,92	102,33	1,3779%
	AREA	434,21	478,76	9,3053%
	CALOR REQUERIDO	22264754,35	22323756,9	0,2643%

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

CONCLUSIONES

- La utilización del método de interpolación lineal en la resolución de problemas de evaporación simple causa variaciones de aproximadamente del 1% en los resultados obtenidos con el simulador.
- El uso del Método de Kopps para la determinación del calor específico de sustancias puras da como resultado valores similares a los mostrados en tablas experimentales.
- La estimación de la eliminación de la variable de la elevación del punto de ebullición en los ejercicios propuestos en los libros de estudios causa una variación del 0,10% en los resultados obtenidos en el simulador.
- El algoritmo desarrollado, presentó la capacidad de resolver sistema de evaporación de simple efecto con un mínimo de 1% de diferencia entre los resultados de la bibliografía y los del simulador.
- El uso de regresiones polinomiales para expresar datos experimentales presenta porcentajes de error mínimo del 1%, por lo cual la variación de resultados es despreciable.
- Luego de realizar las pruebas experimentales y de validación, se determinó que el simulador cumple con los objetivos propuestos.
- Se determinó que al utilizar regresiones polinomiales en el cálculo de las variables del simulador el área de diseño del evaporador, puede presentar un porcentaje de error del 9%, debido a que los problemas de evaporación se asumen regresiones lineales.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere que este trabajo sea utilizado como herramienta didáctica en los cursos de Transferencia de calor y de Diseño de evaporadores, en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil.
- Se aconseja que se continúe el estudio del comportamiento de los simuladores en la aplicación de otras operaciones unitarias tales como: destilación, transferencia de calor, mezclado, partiendo del código fuente utilizado en este proyecto, el cual se fue desarrollando a lo largo del proyecto de investigación.
- Debido a la complejidad en los cálculos, en futuras versiones y correcciones, se sugiere adicionar nuevos métodos más precisos y nuevas rutas para determinar variables en función de variables no descritas en esta versión.
- Se recomienda que para futuros trabajos relacionados con la optimización o propuestas de mejoramiento de este trabajo se utilicen instrumentos de control tales como medidores de flujo, presión, temperatura, concentración, y controles mediante el sistema de lazos de control.
- Para un óptimo funcionamiento del software el ordenador debe contar con un procesador de 1GHz, 25 Mb de espacio libre y mínimo 256 Mb de memoria RAM.

Bibliografía

- Barreiro, J. O. (1990). *Problemas de Ingenieria Quimica - Operaciones Basicas* . Aguilar.
- Felder&Rousseau. (2004). *Principios Elementales de los Procesos Quimicos*. 3ª Edición . Georgia: LIMUSA WILEY.
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Basicos y Calculos en Ingenieria Quimica*. Texas: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A.
- Joyanes, L. (1996). *Fundamentos de Programación* (2a edición ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Joyanes, L. (2006). *Programacion en C++*. *Algoritmos, estructuras de datos y objetos* (Segunda ed.). Madrid: MCGRAW-HILL.
- Martínez, H., Alonso, P., & López, J. (2000). *Simulación de procesos en ingeniería química* (Primera edición ed.). (H. Martínez, P. Alonso, & J. López, Edits.) Mexico D.F., Mexico: Plaza y Valdés S.A.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (1999). *Operaciones unitarias en Ingenieria Quimica* (4ta edición ed.). Aravaca, Madrid, España: McGraw Hill.
- Microsoft. (2016). Obtenido de Developer Network: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/752y8abs.aspx>
- Microsoft. (2016). Obtenido de Developer Network: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/5z06z1kb.aspx>
- Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (2010). *Manual del ingeniero químico* (8va edición ed., Vol. III). (R. Perry, D. Green, & J. Maloney, Edits.) Kansas: MCGRAW HILL.
- Seber, G., & Wild, C. (1989). *Nonlinear Regression*. New York: John Wiley and Sons.

ANEXOS

LISTA DE SIMBOLOS Y CONSTANTES

$^{\circ}C$	Grado Centígrado, unidad en el sistema internacional de cambio de temperatura.
K	Grado Kelvin, unidad del sistema internacional para medir la temperatura absoluta de un cuerpo.
Pa	Pascales, unidad de medida de la presión en el sistema internacional de medidas, equivale a un newton aplicado sobre un metro cuadrado. (N/m ²).
J	Joule, unidad del sistema internacional para medir la energía.
Kg	Kilogramo, unidad del sistema internacional para medir la masa.
F	Flujo másico de alimentación
S	Flujo de vapor de calefacción
P	Flujo de líquido concentrado (salida)
Sc	Flujo de condensado de agua
V	Flujo de vapor producido
T	Temperatura
$EPE (\Delta T_b)$	Elevación del punto de ebullición
T_f	Temperatura del líquido de alimentación.
T_s	Temperatura del vapor de calefaccion
T_{sc}	Temperatura del condensado

T_v	Temperatura del vapor producido
T_p	Temperatura del líquido concentrado (salida)
x_f	concentración del líquido de alimentación.
x_p	concentración del líquido concentrado.
m	Molalidad
h	entalpia
h_f	entalpia del líquido de alimentación
h_p	entalpia del líquido concentrado
h_{sc}	entalpia del condensado
h_v	entalpia del vapor producido
h_s	entalpia del vapor de calefacción
Q	Calor
A	Área del evaporador.
C_p	coeficiente global de transferencia de calor
C_p	capacidad calorífica a 298.15 K (J/mol k)
C_{pf}	capacidad calorífica del líquido de alimentación
C_{pp}	capacidad calorífica del líquido concentrado
C_{pb}	capacidad calorífica del soluto
n	numero de diferentes elementos en el compuesto

N_i número de elementos atómicos i en el compuesto

ΔE_i Valor numérico de la contribución de cada elemento en el compuesto.

R_g constante de los gases ideales: 8,314 J/ mol K

W_a peso molecular del agua: 18 Kg/ Kgmol

L_v calor latente de vaporización: $4,0626 \cdot 10^4$ J/mol

T_{ao} punto de ebullición del agua pura: 373.15 K

APENDICE A

Tabla 7.- Vapor de agua saturado

			Entalpia Especifica (kJ/kg)		
t (°C)	T(K)	P (Kpa)	Liquido saturado	Evaporado	Vapor saturado
20	293,15	2,337	83,86	2454,3	2538,2
25	298,15	3,166	104,8	2442,5	2547,3
30	303,15	4,241	125,7	2430,7	2556,4
35	308,15	5,622	146,6	2418,8	2565,4
40	313,15	7,375	167,5	2406,9	2574,4
45	318,15	9,582	188,4	2394,9	2583,3
50	323,15	12,34	209,3	2382,9	2592,2
60	333,15	19,92	251,1	2358,6	2609,7
70	343,15	31,16	293	2334	2626,9
80	353,15	47,36	334,9	2308,8	2643,8
90	363,15	70,11	376,9	2283,2	2660,1
100	373,15	101,33	419,1	2256,9	2676
120	393,15	198,54	503,7	2202,2	2706
140	413,15	361,38	589,1	2144	2733,1
160	433,15	618,06	675,5	2081,3	2756,7
180	453,15	1002,7	763,1	2013,1	2776,3
200	473,15	1554,9	852,4	1938,6	2790,9
220	493,15	2319,8	943,7	1856,2	2799,9
240	513,15	3347,8	1037,6	1764,6	2802,2
260	533,15	4694,3	1134,9	1661,5	2796,4
280	553,15	6420,2	1236,8	1543,6	2780,4
300	573,15	8592,7	1345,1	1406	2751
340	613,15	14605,2	1595,5	1030,7	2626,2
360	633,15	18675,1	1764,2	721,3	2485,4
374,15	647,3	22120	2107,4	0	2107,4

Fuente: (Perry R. M., 2010)

Tabla 8.- Contribución energética de los elementos para el cálculo de capacidades caloríficas a 298.15 k

ELEMENTO	E	ELEMENTO	E	ELEMENTO	E
C	10,89	Ba	32,37	Mo	29,44
H	7,56	Be	12,47	Na	26,19
O	13,42	Ca	28,25	Ni	25,46
N	18,74	Co	25,71	Pb	31,6
S	12,36	Cu	26,92	Si	17
F	26,16	Fe	29,08	Sr	28,41
Cl	24,69	Hg	27,87	Ti	27,24
Br	25,36	K	28,78	V	29,36
I	25,29	Li	23,25	W	30,87
Al	18,07	Mg	22,69	Zr	26,82
B	10,1	Mn	28,06	Otros	26,63

Fuente: (Perry R. M., 2010)

Tabla 9.- Coeficientes globales de transferencia de calor típicos de los evaporadores

TIPO	W/m ² °C	BTU/ft ² h °F
Evaporadores de tubos verticales largos		
circulación natural	1000 - 2500	200 - 500
circulación forzada	2000 - 5000	400 - 1000
Evaporadores de tubos verticales cortos		
circulación natural	1100 - 2800	200 - 500
Evaporador de película agitada, liquido newtoniano, viscosidad		
1 cP	2000	400
1P	1500	300
100P	600	120

Fuente: (Perry R. M., 2010)

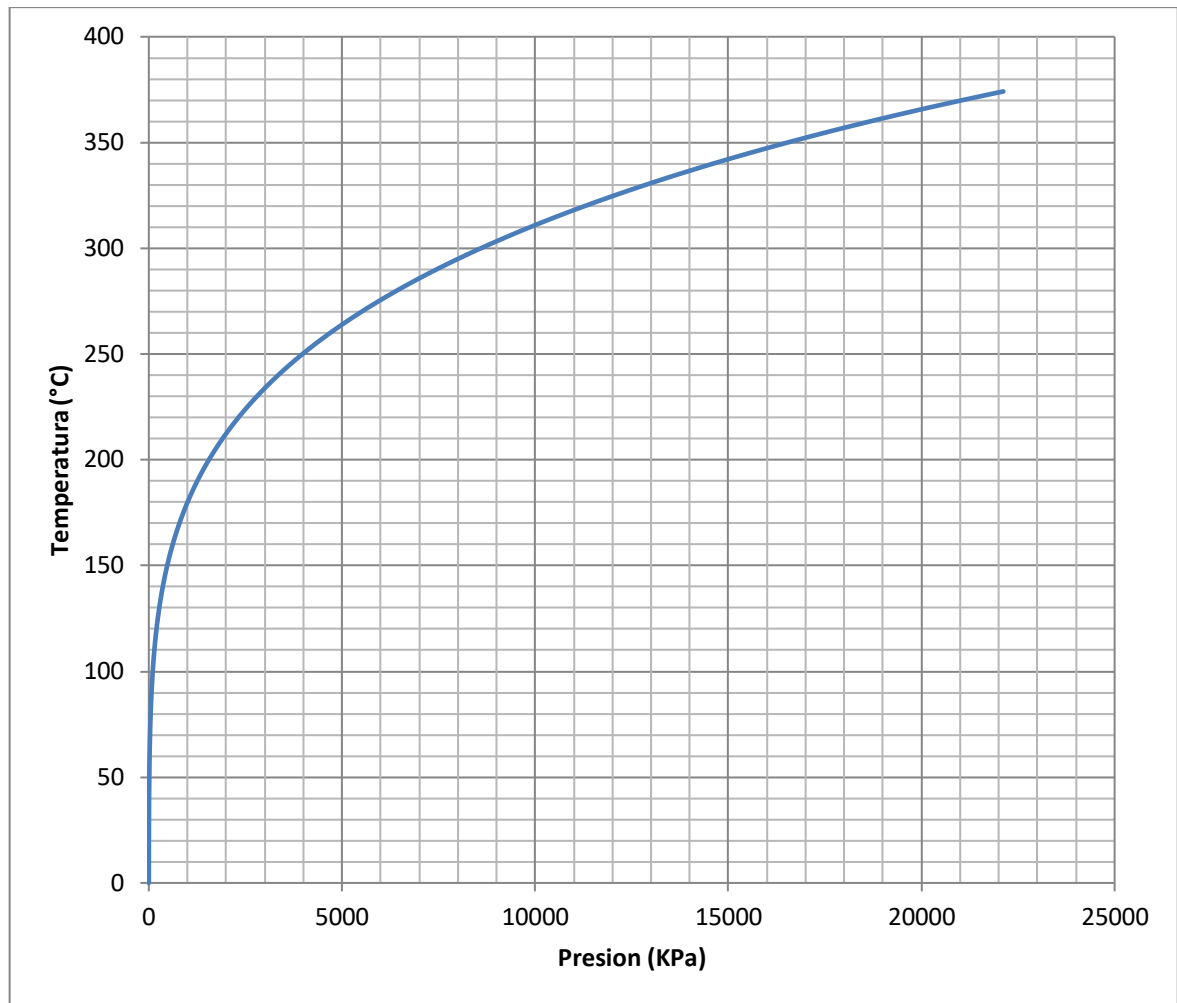
APENDICE B

Tabla 10.- Correlación matemática de la presión en función de la temperatura

P (Kpa)	t (°C)	FORMULA	%ERROR
1,227	10	9,9787	0,0021
1,312	11	11,0273	-0,0025
1,401	12	12,0596	-0,0050
2,337	20	19,9436	0,0028
2,485	21	20,8867	0,0054
2,642	22	21,8576	0,0065
12,34	50	50,1924	-0,0038
12,96	51	50,9346	0,0013
13,61	52	51,8793	0,0023
101,33	100	99,7492	0,0025
108,78	102	102,9767	-0,0096
116,68	104	104,5868	-0,0056
476	150	151,4292	-0,0095
502,08	152	152,3239	-0,0021
529,29	154	154,0591	-0,0004
1554,9	200	197,8693	0,0107
1621	202	202,3741	-0,0019
1689,3	204	204,2229	-0,0011
8592,7	300	297,7857	0,0074
8837,4	302	302,0327	-0,0001
9087,3	304	303,9607	0,0001
16535,1	350	349,9547	0,0001
16945,5	352	351,0236	0,0028
17364,4	354	352,9794	0,0029

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Grafica 1.- Temperatura vs presión



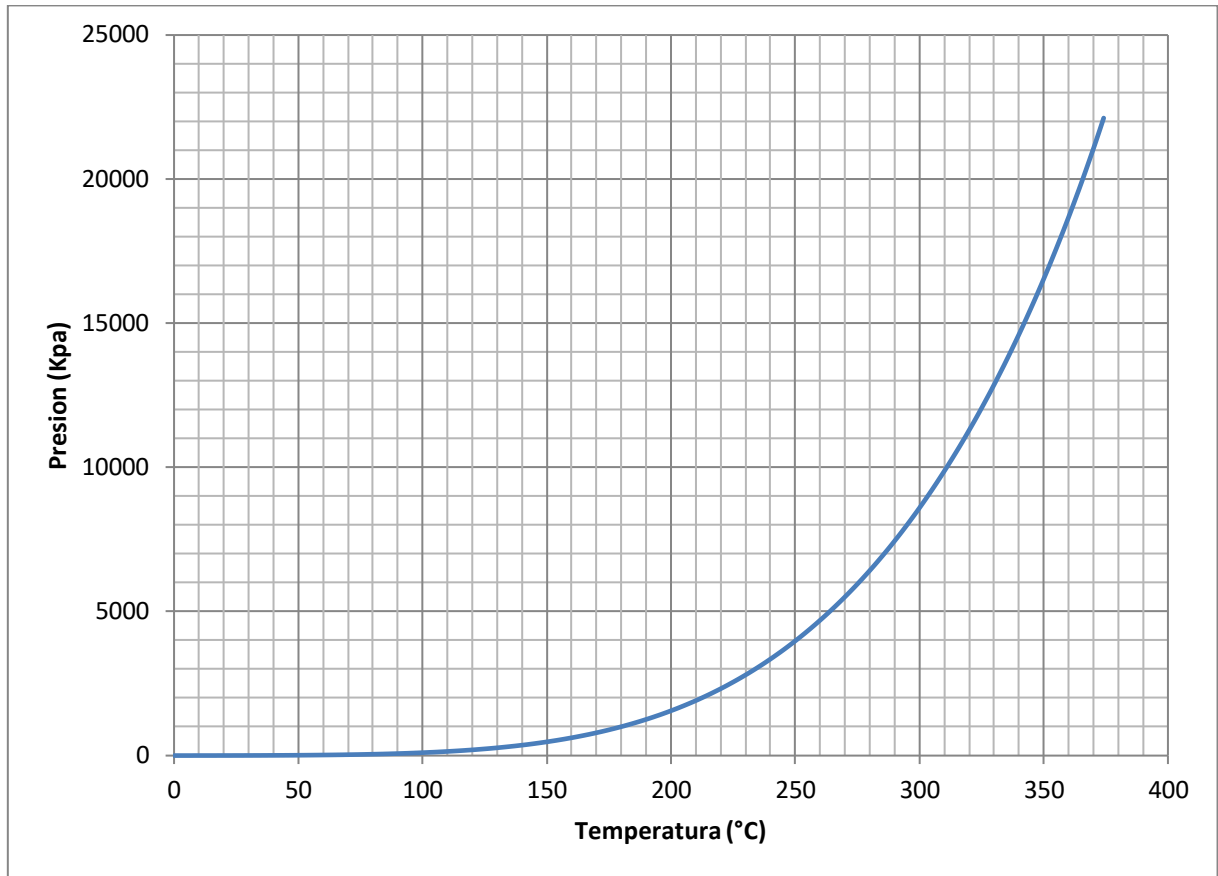
Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 11.- Correlación matemática de la temperatura en función de la presión

t (°C)	P (Kpa)	FORMULA	%ERROR
20	2,337	2,3043	0,0140
21	2,485	2,4469	0,0153
22	2,642	2,5979	0,0167
50	12,34	12,4270	-0,0071
51	12,96	12,9867	-0,0021
52	13,61	13,5860	0,0018
100	101,33	100,6400	0,0068
102	108,78	109,9956	-0,0112
104	116,68	116,7644	-0,0007
150	476	472,0500	0,0083
152	502,08	503,8728	-0,0036
154	529,29	529,3192	-0,0001
200	1554,9	1548,9000	0,0039
202	1621	1625,2432	-0,0026
204	1689,3	1691,2528	-0,0012
250	3977,6	3973,0000	0,0012
252	4113,7	4120,9872	-0,0018
254	4253,4	4257,7688	-0,0010
300	8592,7	8589	0,0004
302	8837,4	8843,5508	-0,0007
304	9087,3	9088,6032	-0,0001
350	16535,1	16519,25	0,0010
352	16945,5	16949,368	-0,0002
354	17364,4	17366,402	-0,0001

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Grafica 2.- Presión vs Temperatura



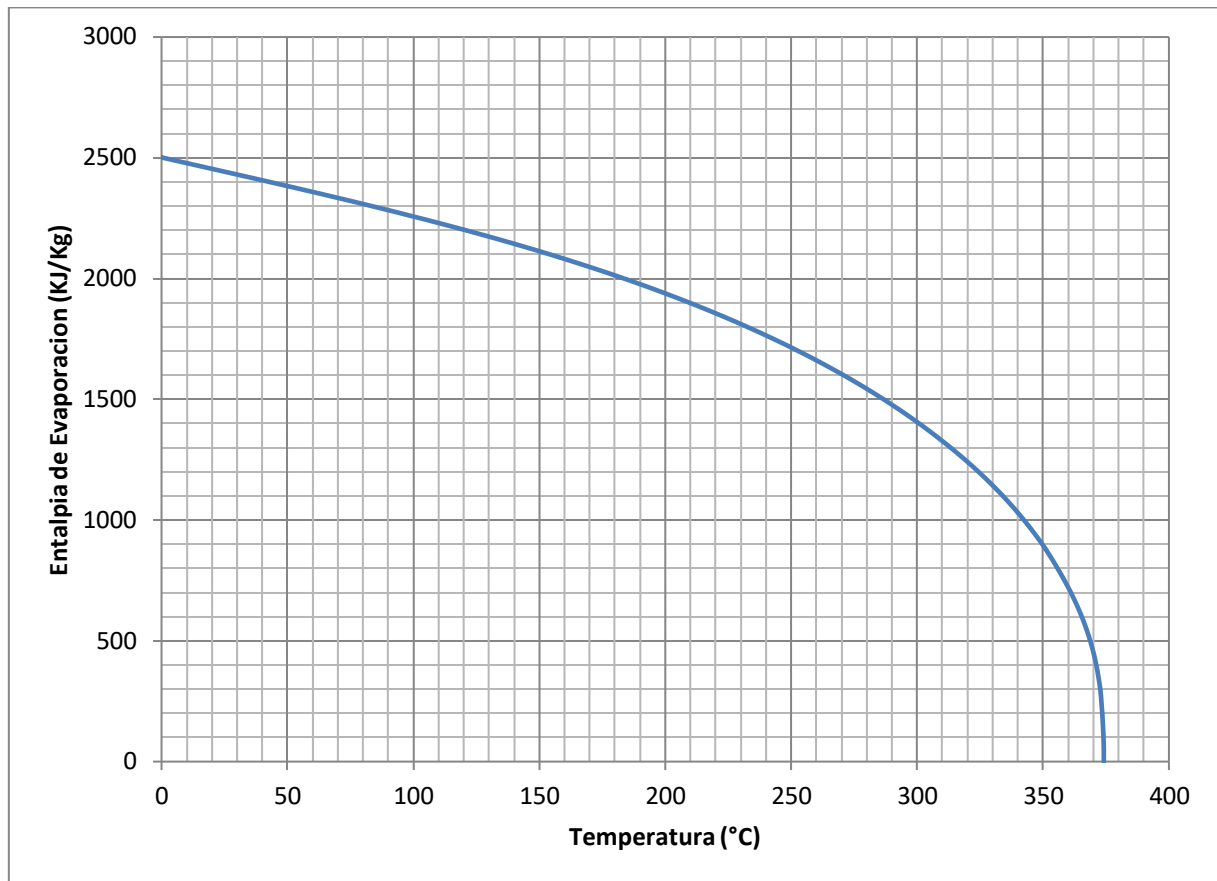
Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 12.- Correlación matemática de la entalpia de vaporización en función de la temperatura

t (°C)	Entalpia de vaporización (KJ/Kg)	Formula	% error
20	2454,3	2454,65	-0,0001
21	2452	2452,31	-0,0001
22	2449,6	2449,96	-0,0001
50	2382,9	2383,04	-0,0001
51	2380,5	2380,60	0,0000
52	2378,1	2378,17	0,0000
100	2256,9	2258,07	-0,0005
102	2251,6	2251,07	0,0002
104	2246,3	2245,93	0,0002
150	2113,2	2113,91	-0,0003
152	2106,9	2107,57	-0,0003
154	2100,6	2101,18	-0,0003
200	1938,6	1940,64	-0,0011
202	1930,7	1929,77	0,0005
204	1922,8	1922,50	0,0002
250	1714,7	1717,83	-0,0018
252	1704,3	1707,29	-0,0018
254	1693,8	1696,63	-0,0017
300	1406	1413,75	-0,0055
302	1390,9	1386,44	0,0032
304	1375,5	1372,61	0,0021
350	895,9	898,70	-0,0031
352	864,2	863,15	0,0012
354	830,9	836,05	-0,0062

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Grafica 3.- Entalpia de vaporización vs temperatura



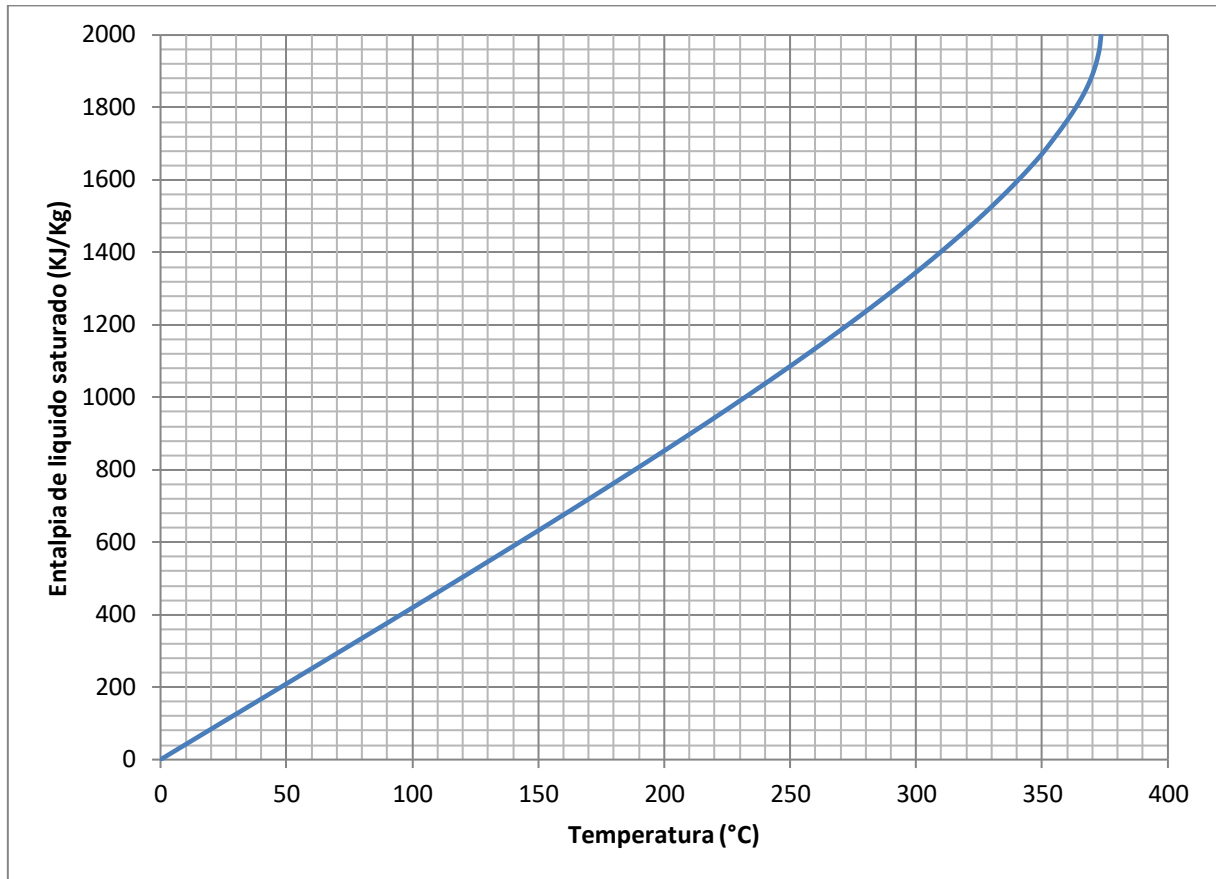
Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 13.- Correlación matemática de la entalpia de liquido saturado en función de la temperatura

t (°C)	Entalpia de liq sat (KJ/Kg)	Formula	% error
20	83,86	83,77	0,0011
21	88,04	87,95	0,0010
22	92,23	92,14	0,0010
50	209,3	209,36	-0,0003
51	213,4	213,55	-0,0007
52	217,6	217,74	-0,0006
100	419,1	418,69	0,0010
102	427,5	427,38	0,0003
104	435,9	435,76	0,0003
150	632,1	631,42	0,0011
152	640,8	640,06	0,0012
154	649,4	648,72	0,0011
200	852,4	850,82	0,0019
202	861,4	860,68	0,0008
204	870,5	869,49	0,0012
250	1085,8	1083,36	0,0022
252	1095,5	1093,15	0,0021
254	1105,3	1102,98	0,0021
300	1345,1	1340,31	0,0036
302	1356,3	1360,48	-0,0031
304	1367,7	1371,48	-0,0028
350	1671,8	1674,92	-0,0019
352	1689,3	1688,69	0,0004
354	1707,5	1705,01	0,0015

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Grafica 4.- Entalpia de líquido saturado vs temperatura



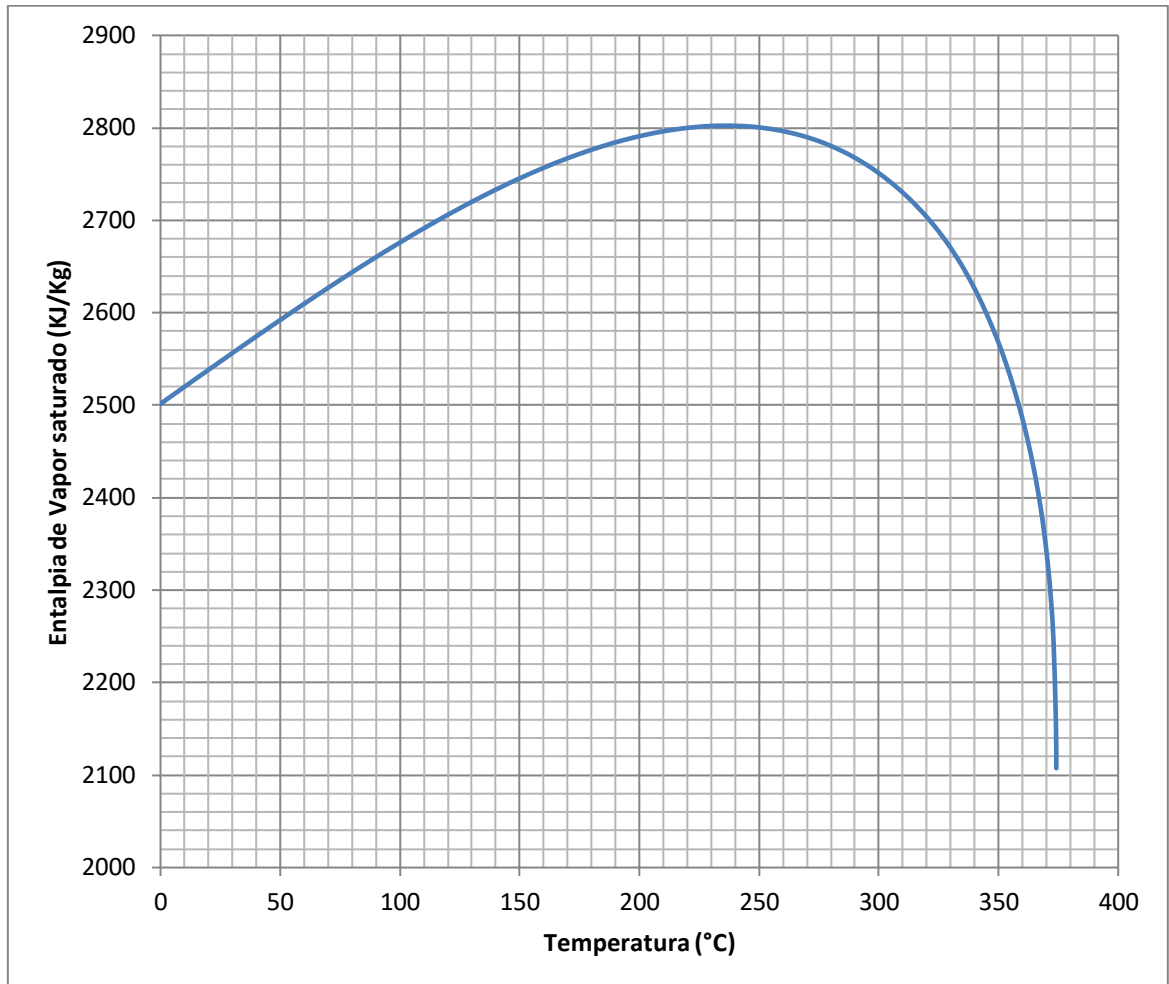
Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Tabla 14.- Correlación matemática de la entalpia de vapor saturado en función de la temperatura

t (°C)	Entalpia de vapor sat (KJ/Kg)	Formula	% error
20	2538,2	2538,35	-0,0001
21	2540	2540,19	-0,0001
22	2541,8	2542,02	-0,0001
50	2592,2	2592,13	0,0000
51	2593,9	2593,88	0,0000
52	2595,7	2595,63	0,0000
100	2676	2676,16	-0,0001
102	2679,1	2683,10	-0,0015
104	2682,2	2686,42	-0,0016
150	2745,4	2758,59	-0,0048
152	2747,7	2761,49	-0,0050
154	2750	2764,37	-0,0052
200	2790,9	2822,92	-0,0115
202	2792,1	2756,35	0,0128
204	2793,2	2756,31	0,0132
250	2800,4	2732,95	0,0241
252	2799,8	2730,72	0,0247
254	2799,1	2728,36	0,0253
300	2751	2635,08	0,0421
302	2747,2	3336,53	-0,2145
304	2743,2	3344,13	-0,2191

Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia

Grafica 5.- Entalpia de vapor saturado vs temperatura



Elaborado por: Gustavo Macías – Israel de Segovia