



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales

**"REINGENIERÍA DEL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO DEL
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA CARRERA
INGENIERÍA QUÍMICA DE LA ESPOL"**

PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

IRENE BALSECA HUNTER

KATHERINE ELIZABETH FLORES LUCAS

Guayaquil - Ecuador

2016

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, a nuestros padres y familiares, por brindarnos su apoyo incondicional durante esta etapa de nuestras vidas, por alentarnos y celebrar con nosotras la culminación de la misma.

Gracias a nuestro tutor del proyecto, PhD. Carlos Balladares Grazzo, por su guía, enseñanzas y consejos, y por su ayuda constante para lograr nuestras metas.

Gracias al Sr. Jairo García Mendoza, por su ayuda incondicional y amistad sincera en todo momento, lo que permitió la culminación exitosa del proyecto.

Gracias a nuestros maestros y amigos, por el soporte brindado durante la realización del proyecto.

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto especialmente a nuestros padres, quienes nos han permitido alcanzar nuestras metas brindándonos un soporte constante y alentándonos a nunca rendirnos. Por ser nuestro pilar y ejemplo de éxito, guiándonos en todo momento de nuestras vidas.

Dedicamos también a nuestros hermanos, por ser nuestros mejores aliados y ofrecernos su apoyo siempre que ha sido necesitado.

Por último, dedicamos nuestro proyecto a nuestros familiares y amigos, por el cariño brindado y por formar parte de cada etapa de nuestras vidas.

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este proyecto nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL."

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Irene Balseca Hunter

Katherine Elizabeth Flores Lucas

RESUMEN

La evaporación es una operación unitaria de transferencia de calor fundamentada en la separación de una sustancia líquida que se encuentra en una disolución sólido-líquido, mediante su ebullición, siendo la solución concentrada el producto de interés. Para llevar a cabo esta operación unitaria se utiliza un equipo llamado evaporador. La evaporación tiene un amplio campo de aplicación en la Ingeniería Química, y ha sido mayormente utilizada en la industria azucarera, por lo que el estudio de la misma es necesario para reforzar los conocimientos de los estudiantes de dicha carrera.

El presente proyecto tiene como objetivo principal realizar una reingeniería conceptual del evaporador de simple efecto que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera Ingeniería Química de la ESPOL, y dotarlo de los equipos de proceso e instrumentos de medición y control apropiados que permitan una correcta enseñanza e investigación de esta importante operación unitaria de Ingeniería Química.

Para lograr el objetivo, se llevaron a cabo pruebas en el equipo original con una solución azucarada, y se realizaron los cálculos necesarios de flujos, eficiencia, calor transferido y concentración final de la solución previos a las modificaciones realizadas en el evaporador. Con estos datos se decidieron los cambios que se debían realizar para maximizar la eficiencia del equipo.

El evaporador de simple efecto se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera Ingeniería Química de la ESPOL, ya hechas las modificaciones de su reingeniería. Se realizaron pruebas posteriores a las modificaciones, con el propósito de perfeccionar la operación unitaria y conseguir una mayor evaporación de la solución mediante el uso de un equipo didáctico. Para las pruebas en el evaporador, se utiliza una solución de azúcar y agua. Adicionalmente a la solución de agua con azúcar, se realizó una prueba con leche para evaluar si en el equipo se pueden trabajar otros sistemas.

El evaporador de simple efecto cuenta con un manual de operación, que detalla su correcta operación durante las pruebas de laboratorio y las condiciones de operación del equipo.

Palabras clave: Operación unitaria, evaporación, transferencia de calor, punto de ebullición, evaporador de simple efecto.

ABREVIATURAS

A_o	Área de transferencia de calor
BTU	British Thermal Units
EPE	Elevación del Punto de Ebullición
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
HP	Horse Power
INOX	Inoxidable
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
P	Presión
T	Temperatura
U	Coeficiente de transferencia de calor
Q	Calor
C_p	Calor específico
PSIA	Pounds per Square Inch Absolute
PSI	Pounds per Square Inch
RPM	Revoluciones por minutos

SIMBOLOGÍA

A	Amperio
W	Watts
ϕ	Diámetro
%	Porcentaje
"	Pulgadas
h	Hora
Btu/h ft ² °F	BTU por hora - pie cuadrado - grados Fahrenheit
mm	Milímetros
cm	Centímetros
m	Metros
m ²	Metro cuadrado
Δ	Delta
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit

Kg	Kilogramo
Kg/h	Kilogramo por hora
Kcal	Kilocaloría
KJ/kg	Kilojoule por kilogramo
KJ/kg °C	Kilojoule por kilogramo - grados centígrados
KJ/h	Kilojoule por hora
KJ/h m ² °C	Kilojoule por hora-metro cuadrado - grados centígrados
kPa	Kilopascal
inHg	Pulgadas de Mercurio
L	Litro
ml	Mililitro
°BRIX	Grados BRIX
P	Poise
Q	Calor
V	Voltios

W Watts

$W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ Watts por metro cuadrado - grados centígrados

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN.....	V
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XVIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
CAPÍTULO I ANTECEDENTES.....	23
1.1 Antecedentes.....	24
1.2 Mapa de ubicación.....	25
1.3 Objetivos.....	26
1.3.1 Objetivo General.....	26

1.3.2 Objetivos específicos.....	26
1.4 Planteamiento del problema	27
1.5 Justificación	30
1.6 Hipótesis	32
1.7 Metodología utilizada	33
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO.....	37
2.1 Evaporación.....	38
2.2 Aplicaciones.....	39
2.3 Factores del proceso	40
2.3.1 Concentración de la alimentación.....	40
2.3.2 Solubilidad	41
2.3.3 Formación de espuma	41
2.3.4 Presión y temperatura	42
2.3.5 Materiales de construcción	43
2.3.6 Incrustaciones.....	44
2.4 Principios de la evaporación	44
2.4.1 Transferencia de masa	45

2.4.2	Transferencia de calor	46
2.4.3	Coeficiente global de transferencia de calor	47
4.2.4	Balance de energía.....	48
2.4.5	Elevación del punto de ebullición (EPE)	51
2.4.6	Coeficientes de transferencia de calor.....	52
2.4.7	Economía de un evaporador	53
2.5	Tipos de evaporadores	55
2.5.1	Marmita abierta o artesa.....	55
2.5.2	Evaporador de tubos horizontales con circulación natural.....	56
2.5.3	Evaporador vertical con circulación natural	56
2.5.4	Evaporador vertical de tubos largos	57
2.5.5	Evaporador de caída de película	57
2.5.6	Evaporador de circulación forzada	58
2.5.7	Evaporador de película agitada	58
2.6	Evaporadores de simple efecto.....	59
2.7	Evaporación con sistema de vacío	60
CAPÍTULO III MODIFICACIONES DE LA REINGENIERÍA		63

3.1 Modificaciones	64
3.2 Reingeniería de la cámara de evaporación	64
3.3 Dimensionamiento de la tubería de salida de vapor	65
3.4 Sistema de recirculación	66
3.5 Sistema de Vacío	67
3.4.1 Tanque del condensado	68
3.4.2 Tanque de protección para la bomba de vacío	69
3.4.3 Bomba de vacío	70
3.5 Sistema de inspección	71
3.6 Accesorios y tuberías	72
3.6.1 Termómetros	72
3.6.2 Vacuómetro	73
3.6.3 Rotámetro	73
3.6.4 Válvulas	74
3.6.5 Tuberías	74
3.7 Panel de control	75
CAPÍTULO IV MANUAL DE OPERACIÓN DEL EVAPORADOR	76

4.1 Simbología del equipo	77
4.2 Identificación de riesgos	78
4.3 Materiales, equipos y sustancias	80
4.4 Preparación de la solución.....	81
4.5 Puesta en marcha del equipo	81
4.5.1 Sistema a presión atmosférica.....	81
4.5.2 Sistema a presión negativa (vacío).....	83
4.6 Toma de muestra de la solución	84
4.7 Parada del equipo.....	85
4.7.1 Sistema a presión atmosférica.....	85
4.7.2 Sistema a presión negativa (vacío).....	85
CAPÍTULO V PRUEBAS EXPERIMENTALES	87
5.1 Experimentación	88
5.2 Prueba experimental del equipo original.....	88
5.3 Pruebas experimentales luego de la reingeniería	96
5.3.1 Prueba No.1 atmosférica a 5 psig.....	96
5.3.2 Prueba No.2 atmosférica a 5 psig.....	103

5.3.3 Prueba No.3 a 5psig en vacío	110
5.3.4 Prueba No.4 a 5 psig en vacío.....	117
5.3.5 Prueba No.5 atmosférica a 18 psig.....	124
5.3.6 Prueba No.6 atmosférica a 18 psig.....	131
5.3.7 Prueba No.7 a 18 psig en vacío	138
5.3.8 Prueba No.8 a 18 psig en vacío	145
5.3.9 Prueba No.9 a 30 psig atmosférica.....	152
5.3.10 Prueba No.10 a 30 psig en vacío.....	159
5.4 Prueba adicional con leche entera.....	170
CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....	178
6.1 Análisis de resultados.....	179
6.2 Conclusiones	182
6.3 Recomendaciones	184
BIBLIOGRAFÍA.....	186
APÉNDICES	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Mapa de Ubicación del Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	25
Fig. 1.2. Dimensiones del evaporador de simple efecto original del Laboratorio de Operaciones Unitarias	29
Fig. 1.3. Diagrama de bloques de la metodología utilizada	36
Fig. 2.1. Diagrama de un evaporador de simple efecto.....	60
Fig. 3.1. Deflectores del equipo.....	66
Fig. 3.2 Tanque del condensado.....	70
Fig. 3.3 Tanque de protección para la bomba.....	71
Fig. 3.4 Dimensión de los Visores.....	72

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 5.1 Concentración vs Tiempo de la prueba inicial	89
Gráfico 5.2 Concentración vs tiempo de la prueba # 1 a 5 psig atmosférica ...	96
Gráfico 5.3 Concentración vs Tiempo de la prueba #2 a 5 psig atmosférica ..	103
Gráfico 5.4 Concentración vs Tiempo de la prueba #1 a 5 psig en vacío	110
Gráfico 5.5 Concentración vs Tiempo de la prueba #2 a 5 psig en vacío	117
Gráfico 5.6 Concentración vs Tiempo de la prueba #1 a 18 psig atmosférica	124
Gráfico 5.7 Concentración vs Tiempo de la prueba #2 a 18 psig atmosférica	131
Gráfico 5.8 Concentración vs Tiempo de la prueba #1 a 18 psig en vacío	138
Gráfico 5.9 Concentración vs Tiempo de la prueba #2 a 18 psig en vacío	145
Gráfico 5.10 Concentración vs Tiempo de la prueba #1 a 30 psig atm.....	152
Gráfico 5.11 Concentración vs Tiempo de la prueba #2 a 30 psig atm.....	159
Gráfico 5.12 Comparación de la evaporación antes y después de la reingeniería	168
Gráfico 5.13 Gráfica comparativa de la evaporación en sistema atmosférico y de vacío a 5 psig.....	168
Gráfico 5.14. Gráfica comparativa de la evaporación en sistema atmosférico y de vacío a 18 psig.....	169
Gráfico 5.15 Concentración vs Tiempo de la evaporación de leche entera	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Especificaciones de la Bomba SIEMENS.....	67
Tabla II. Especificaciones de la Bomba de Vacío.....	71
Tabla III. Simbología del Evaporador de simple efecto	77
Tabla IV. Riesgos en la operación del Evaporador.....	79
Tabla V. Datos obtenidos en la prueba inicial	89
Tabla VI. Resumen de la prueba inicial	95
Tabla VII. Datos de la prueba No.1 atmosférica a 5 psig	96
Tabla VIII. Resumen de la prueba No.1	102
Tabla IX. Datos de la prueba No.2 atmosférica a 5 psig	103
Tabla X. Resumen de la prueba No.2	109
Tabla XI. Datos de la prueba No.3 a 5 psig en vacío (22 inHg).....	110
Tabla XII. Resumen de la prueba No.3	116
Tabla XIII. Datos de la prueba No.4 a 5 psig en vacío (22 inHg).....	117
Tabla XIV. Resumen de la prueba No.4	123
Tabla XV. Datos de la prueba No.5 atmosférica a 18 psig.....	124
Tabla XVI. Resumen de la prueba No.5	130
Tabla XVII. Datos de la prueba No.6 atmosférica a 18 psig.....	131
Tabla XVIII. Resumen de la prueba No.6	137
Tabla XIX. Datos de la prueba No.7 a 18 psig en vacío (22 inHg)	138

Tabla XX. Resumen de la prueba No.7	144
Tabla XXI. Datos de la prueba No.8 a 18 psig en vacío (22 inHg)	145
Tabla XXII. Resumen de la prueba No.8	151
Tabla XXIII. Datos de la prueba No.9 atmosférica a 30 psig	152
Tabla XXIV. Resumen de la prueba No.9.....	158
Tabla XXV. Datos de la prueba No.10 a 30 psig en vacío (18 inHg - 28inHg)	159
Tabla XXVI. Resumen de la prueba No.10.....	165
Tabla XXVII. Resultados de los flujos de las pruebas experimentales y teóricos	166
Tabla XXVIII. Resultados de los balances de calor de las pruebas experimentales y teóricos	167
Tabla XXIX. Datos de la prueba con leche entera a 24 psig en vacío (28 inHg)	170
Tabla XXX. Resultados de la prueba de evaporación de leche entera.....	177

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto consiste en la reingeniería del evaporador de simple efecto ya existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL. El equipo fue construido en el año 2014 y carecía de accesorios complementarios e instrumentos de medición y control que permitan una adecuada práctica experimental. Sumado a ciertas limitaciones de diseño, impedían una mejor eficiencia. Con la reingeniería se busca aumentar la eficiencia del evaporador original, además de volver al equipo más didáctico.

La evaporación es una operación unitaria importante en la carrera Ingeniería Química, ya que tiene un amplio campo de aplicaciones en el sector industrial. Debido a que su mayor uso es en la industria azucarera, el equipo está diseñado para trabajar con una solución azucarada. Sin embargo, durante la experimentación también se utilizó leche para obtener leche evaporada.

La evaporación se fundamenta en la separación de una sustancia líquida de una disolución sólido-líquida. La alimentación entra por un costado del equipo, por encima de la calandria, y el vapor de agua ingresa por el otro. Mediante la ebullición de la disolución, se logra obtener una solución concentrada que es el producto de interés. Al incrementar la eficiencia, se busca que la concentración final de la solución sea mayor en un menor tiempo.

Para aumentar la eficiencia se realizaron los cálculos respectivos con el equipo original y se decidieron los cambios, incluyendo equipos complementarios, instrumentos de control, accesorios, tuberías, entre otros, además de implementar un sistema de vacío con recirculación. Con el equipo, luego de las modificaciones, se puede elegir si se desea evaporar una solución atmosféricamente o al vacío, para comparar y entender la diferencia de los dos sistemas.

Con el evaporador, los estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Química podrán afianzar sus conocimientos teóricos haciendo uso del equipo para fines prácticos. Además, podrán comparar los resultados de utilizar evaporación con sistema atmosférico o con vacío, y observar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes

Con el paso del tiempo, se ha conocido que el proceso de evaporación es fundamental para el período regenerativo del agua y por consiguiente para la vida. Mediante estas reseñas, se han hecho estudios de tal manera que sea empleado en la vida cotidiana.

A partir de la Revolución Industrial, este proceso fue aplicado para la elaboración de productos alimenticios. En esta época fue aprovechado el vapor de agua en un equipo llamado “Máquina de Vapor”, que se trata de un motor de combustión externa que convierte la energía térmica en energía mecánica o cinética. [1]

El vapor de agua generado es manipulado como medio calefactor, y, de esta manera, concentrar soluciones diluidas, separar y obtener productos de mayor interés.

Por lo tanto, la evaporación es considerada como una operación unitaria, al ser un proceso físico. En la actualidad, este proceso es esencial en casi todas las industrias alimenticias, farmacéuticas, petroleras, entre otras.

1.2 Mapa de ubicación

La reingeniería del evaporador se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias que está ubicado a un extremo de la avenida principal dentro de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. El laboratorio pertenece al Departamento de Ciencias Químicas, que a su vez es parte de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. La ESPOL se encuentra en el kilómetro 30.5 de la Vía Perimetral en la ciudad de Guayaquil, sector Prosperina.

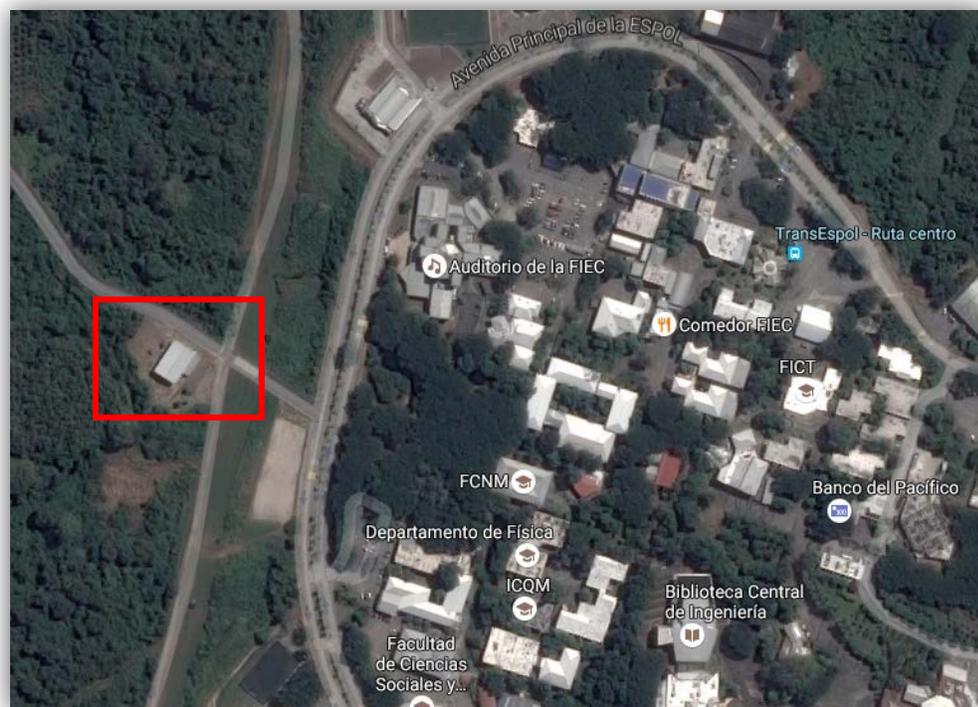


Fig. 1.1. Mapa de Ubicación del Laboratorio de Operaciones Unitarias
Fuente: Google Maps [22]

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Optimizar el evaporador de simple efecto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, mediante su reingeniería, con el fin de repotenciarlo y mejorar el desempeño en los ensayos didácticos que se realizan en dicha unidad utilizando una solución azucarada.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar la funcionalidad y eficiencia de la unidad de evaporación de efecto simple en sus puntos críticos de control mediante su operación, cálculos teóricos y prácticos.
- Aplicar un sistema de vacío a la unidad de evaporación para potenciar el equipo de evaporación con el fin de disminuir la temperatura de ebullición de la solución.
- Comparar la eficiencia del evaporador con sistemas sin vacío y con vacío, para determinar sus diferencias e identificar los beneficios de la bomba de vacío implementada.
- Aportar al Laboratorio de Operaciones Unitarias mediante la mejora del equipo de evaporación, para que los estudiantes de Ingeniería Química puedan reforzar sus conocimientos teóricos adquiridos.

- Realizar una experimentación adicional con el fin de evaluar la eficiencia del evaporador vertical de tubos cortos de simple efecto utilizando una solución de mayor viscosidad a la del agua azucarada.

1.4 Planteamiento del problema

La evaporación es una operación unitaria que busca separar de una solución el solvente volátil, mediante la ebullición de este. De esta manera, la solución tendrá una concentración mayor del soluto no volátil. Este proceso se realiza mediante un equipo llamado evaporador, que puede ser de simple o múltiples efectos. En un evaporador de simple efecto el vapor saliente será condensado y desechado, mientras que en uno de dos o más efectos será reutilizado. [29]

Esta operación unitaria es ampliamente utilizada en los campos de la carrera de Ingeniería Química, especialmente en la industria azucarera, en donde sirve para reducir la cantidad de agua para obtener la meladura. Debido a las aplicaciones que tiene la evaporación en el campo de la Ingeniería Química, es importante que las universidades que oferten la carrera también tengan sistemas de evaporación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. De esta

manera, los estudiantes pueden reforzar los conocimientos teóricos al llevarlos a la práctica.

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química de la ESPOL, cuenta con un evaporador de simple efecto en la actualidad. La eficiencia del equipo, cuando recién se construyó, era del 71.2%. Este equipo requiere un mantenimiento cada 6 meses, que implica revisar los manómetros y asegurarse de que la trampa de vapor no se encuentre tapada [1]. Sin embargo, el mantenimiento dado al evaporador no ha sido constante, lo que ha causado que la eficiencia disminuya en las prácticas realizadas por los estudiantes.

Las razones de la disminución de la eficiencia del equipo son varias. Primero, la entrada del vapor al evaporador no tiene una presión constante, lo que provoca que la eficiencia varíe según sus condiciones. Además, la salida de la tubería del evaporador no tiene un diámetro suficiente para disminuir la pérdida de carga. A mayor diámetro de la tubería, la pérdida será menor [10]. El equipo no cuenta con un sistema al vacío, que ayudaría a disminuir la temperatura de ebullición de la solución.

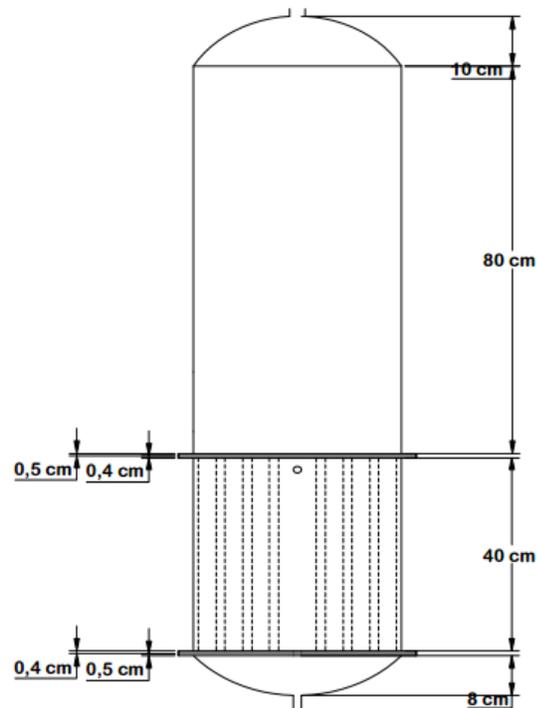


Fig. 1.2. Dimensiones del evaporador de simple efecto original del Laboratorio de Operaciones Unitarias

Fuente: Basantes, Montesdeoca, & Santos, 2014. [1]

Por falta de instrumentos de control en el equipo, los datos que necesitan los estudiantes para realizar sus cálculos en la práctica no pueden ser tomados. Esto lleva a asumir datos, afectando a su aprendizaje debido a los resultados con porcentajes de error altos.

Mediante la reingeniería del evaporador de simple efecto, se busca aumentar la eficiencia del mismo. Para esto, se realizarán modificaciones en las tuberías, se agregarán accesorios y se implementará un sistema de vacío. Se instalarán

tuberías e instrumentos de control en el equipo, como un vacuómetro, para tener datos más precisos al realizar las prácticas de laboratorio [1]. Además, se agregará una válvula reguladora de presión al equipo. De esta manera, al realizar las modificaciones al equipo de evaporación del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se mejorará también el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Química, quienes utilizan el evaporador en varias prácticas a lo largo de su carrera.

1.5 Justificación

La evaporación es una operación unitaria correspondiente a la carrera de Ingeniería Química, por lo que es necesario que exista un evaporador funcional dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la misma. Esta operación unitaria es utilizada ampliamente en campos de la Ingeniería Química, tales como la industria azucarera, la industria alimenticia, los laboratorios de productos químicos, entre otros. Debido a los extensos usos de la evaporación, es necesario contar con un equipo de alto rendimiento en el laboratorio, para que los estudiantes tengan la oportunidad de reforzar sus conocimientos mediante la práctica.

La falta de mantenimiento, además de otros factores de diseño, del evaporador de simple efecto encontrado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias afecta en el rendimiento del equipo. La presión de entrada del vapor al evaporador no se mantiene constante, ya que no existe ninguna válvula que la regule. Además, el diámetro de la tubería de salida de vapor al condensador no es suficiente para que haya una baja caída de presión, lo que disminuye a su vez la concentración final de la solución.

Al ser la evaporación una operación unitaria estudiada dentro de la Ingeniería Química, los estudiantes deben tener la oportunidad de realizar una práctica en la que obtengan datos y resultados reales, no estimaciones al asumir una presión constante ni errores por fallas del equipo.

Con este proyecto se busca realizar la reingeniería del evaporador del Laboratorio de Operaciones Unitarias para realizar las modificaciones necesarias. Se implementarán trampas de vapor y una mirilla de inspección. Se agregará una válvula reductora de presión para lograr mantener la presión del sistema constante. Además, se va a aumentar el diámetro de la tubería de salida del vapor al condensador para lograr obtener una menor caída de presión y así mejorar el rendimiento del equipo [29].

También se va a acoplar una bomba de vacío en el sistema de evaporación, lo que aumenta el rendimiento termodinámico del proceso. Esto significa que se evaporará una mayor cantidad del componente volátil debido a la menor presión, aplicando menos calor [9]. En otras palabras, el punto de ebullición de la solución disminuye, logrando llegar a esta temperatura con mayor facilidad.

De esta manera, al realizar la práctica de evaporación se podrán obtener resultados más exactos y obtener una mayor concentración de la solución final, lo que significa que se va a incrementar la eficiencia del equipo. Con la reingeniería del evaporador se busca aportar al Laboratorio de Operaciones Unitarias con un equipo de mayor rendimiento, que sirva como soporte para el aprendizaje de los estudiantes de la carrera.

1.6 Hipótesis

La repotenciación de la unidad de evaporación de simple efecto alcanza la mejora en un 10% de la eficiencia del equipo durante los ensayos realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

1.7 Metodología utilizada

- **Fase 1: Recopilación de información bibliográfica**

Esta fase incluye la revisión de fuentes bibliográficas y la recopilación de información acerca de la operación unitaria de evaporación y del equipo. Se revisaron libros, páginas web, artículos en Internet, publicaciones de universidades, entre otros, para lograr obtener la información necesaria.

- **Fase 2: Obtención de datos del equipo original**

Esta fase comprende la ejecución de las pruebas experimentales en el equipo original, antes de las modificaciones de la reingeniería. Se realizó para calcular la eficiencia del equipo y poder comparar posteriormente. Al utilizar balances de materia y energía, se lograron obtener los datos del equipo inicial. Con esta información, se decidieron los cambios que se debían realizar para mejorar la eficiencia del evaporador, incluyendo el cambio de tuberías y agregar accesorios. Además, se decidió implementar un sistema de vacío.

- **Fase 3: Adquisición de materiales y realización de las modificaciones**

Esta fase se extiende desde la obtención del presupuesto de los materiales, hasta la construcción y adaptación de las modificaciones al equipo. Se buscó el presupuesto de los materiales en varios lugares para decidirse por el más conveniente, sin descuidar la calidad de los productos. Luego de decidir, se compraron materiales como tuberías, termómetros, manómetros, bombas, válvulas, entre otros, necesarios para la reingeniería según las conclusiones de la fase anterior. Posteriormente se procedió desarmar el equipo y se procedieron a realizar los cambios respectivos de la reingeniería.

- **Fase 4: Pruebas prácticas, verificación y obtención de resultados**

Esta fase consiste en las pruebas experimentales realizadas con el equipo posterior a las modificaciones de su reingeniería. Se hicieron pruebas con los dos sistemas del evaporador, atmosférico y vacío, a presiones diferentes. Todas las pruebas ingresaron con la misma concentración inicial de solución azucarada y masa de la alimentación para poder comparar los resultados de ambos sistemas. Además, se

realizó una prueba para comparar con los datos obtenidos de la práctica previa a las modificaciones, para demostrar el aumento de eficiencia del equipo. Adicionalmente, se realizó una prueba utilizando leche entera para poder analizar la eficiencia del equipo utilizando una solución con mayor viscosidad.

- **Fase 5: Redacción, entrega del equipo y presentación del proyecto**

Esta fase comprende la redacción de la tesis, incluyendo la información bibliográfica investigada, la metodología del proyecto, los datos previos y posteriores a la reingeniería, y el análisis y conclusiones a partir de los resultados. Además, se realiza la entrega formal del Evaporador de Simple Efecto al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL, para que funcione como método de aprendizaje para los alumnos de la carrera de Ingeniería Química. Por último, se realiza la presentación formal del proyecto frente a un jurado seleccionado.

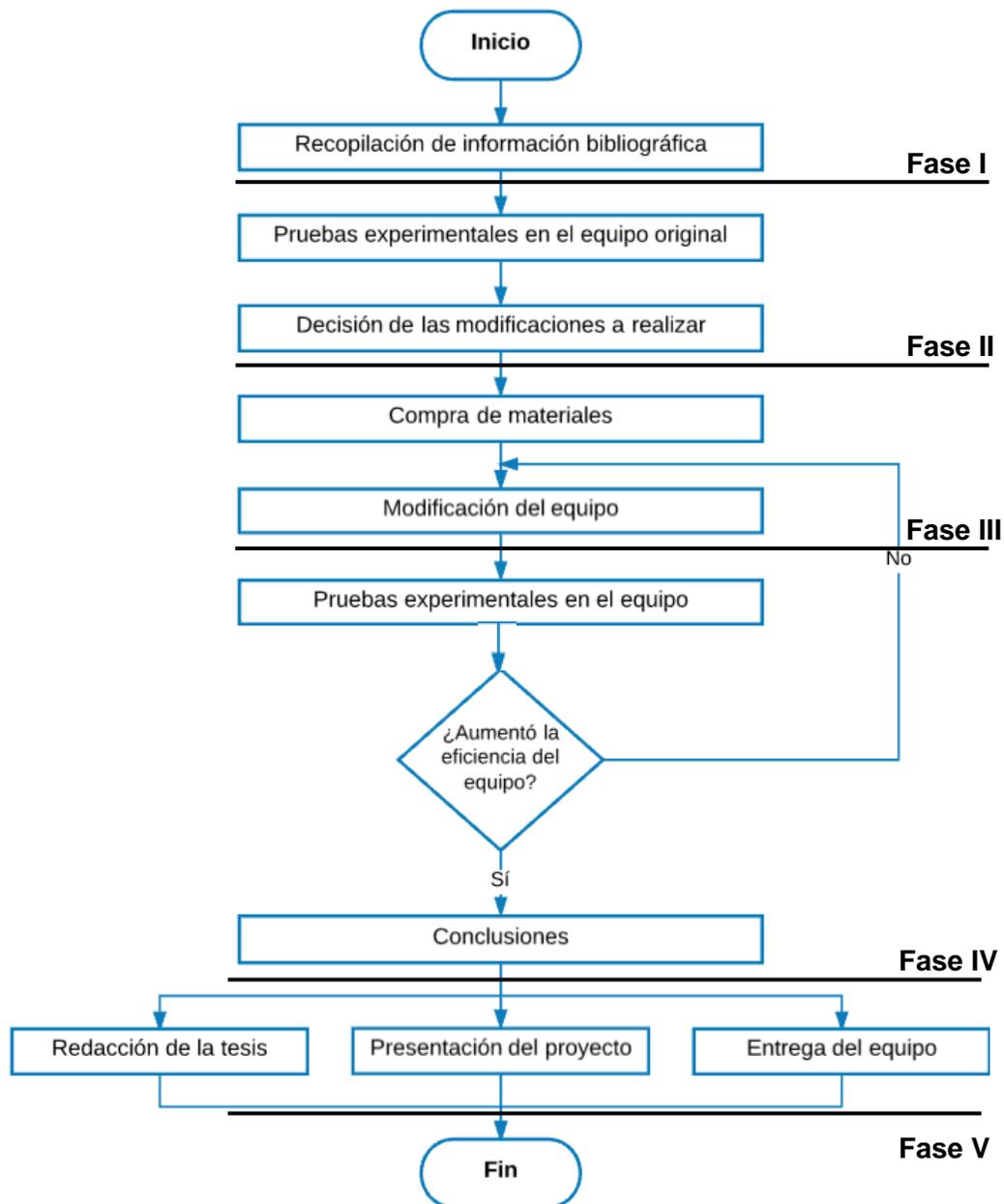


Fig. 1.3. Diagrama de bloques de la metodología utilizada
Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DEL

ESTUDIO

2.1 Evaporación

La operación unitaria de evaporación se basa en la separación de una sustancia líquida (que generalmente es agua) contenida en una disolución sólido-líquida a través de su ebullición, teniendo como fin la obtención de dicha solución con una concentración más elevada. En otras palabras, se busca separar de una solución al solvente volátil. [42]

En la mayoría de los casos, la solución líquida concentrada de soluto no volátil es el producto de interés de la operación y tiene un valor comercial, mientras que el vapor es condensado y para luego ser desechado. Esta solución concentrada puede llegar a ser un líquido altamente viscoso. Algunas veces también puede producirse una suspensión de cristales, cuando el líquido ya se encuentra saturado. Esto ya conlleva a la operación unitaria de cristalización. [29]

El proceso de evaporación se lleva a cabo por medio de un equipo llamado evaporador, que puede ser de simple o múltiples efectos. En un evaporador de simple efecto, también llamado de una sola etapa, el vapor saliente será condensado y desechado, mientras que en uno de dos o más efectos será reutilizado en la siguiente etapa. [29]

2.2 Aplicaciones

El producto de interés de la evaporación es la solución concentrada del compuesto no volátil, por lo que el uso de evaporadores es esencial para la concentración de sustancias a nivel industrial. Entre los ejemplos más comunes del proceso de evaporación se encuentran la concentración de soluciones azucaradas, cloruro de sodio, hidróxido de sodio, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja. [21]

Sin embargo, a nivel mundial existen muchas más aplicaciones industriales de esta operación unitaria, como es el caso de obtención de medicinas tradicionales china, medicinas orientales, preparación de dextrosa, líquidos orales, químicos, alimentos, mono sodio, glutamato y producción de leche, entre otros. También son importantes para recuperar solventes orgánicos como es el alcohol. [33]

Existen casos específicos en los que el producto de interés es el vapor de agua, no la solución concentrada: por ejemplo, en aguas contaminadas en las que busca eliminar sólidos que podría contener el agua para su purificación, ya sea para consumo humano o para su uso en procesos específicos. Esta operación se conoce como destilación, pero es básicamente evaporación. [29]

De esta misma manera, existe una operación que se conoce comúnmente como destilación del agua de mar, que, en realidad, es la evaporación del agua para recuperar el agua potable, eliminando los sólidos que pudiese contener. [18]

2.3 Factores del proceso

La evaporación depende de las características físicas y químicas de la solución que se alimenta al equipo y del vapor utilizado para calentar, así como de la temperatura y presión utilizados durante el proceso. Se analizarán las características más importantes que inciden en el proceso de evaporación de una solución y que son necesarias de conocer para el diseño de un evaporador. [21]

2.3.1 Concentración de la alimentación

En la mayoría de los casos la concentración inicial de la alimentación es baja, por lo que la solución entra bastante diluida y la viscosidad del líquido es similar a la del agua. Debido a que las propiedades físicas de la solución son muy parecidas a las del agua, el proceso de evaporación se opera con altos coeficientes de calor. A medida que transcurre la evaporación, la solución va ganando concentración del componente no

volátil y puede aumentar su viscosidad y densidad de manera notable, disminuyendo drásticamente el coeficiente de calor. Para evitar este cambio brusco, se debe tener una recirculación o turbulencia adecuada. [21]

2.3.2 Solubilidad

Debido al aumento en la concentración de soluto, la solubilidad del material se puede exceder y causar la formación de cristales. Este factor limita la concentración máxima que un evaporador podrá obtener de una solución inicial. Generalmente, la solubilidad aumenta con la temperatura por lo que se puede provocar la cristalización de la solución final al enfriarla cuando sale del evaporador. [31]

2.3.3 Formación de espuma

Existen materiales que pueden formar espuma durante la ebullición, generalmente son compuestos orgánicos. La espuma sale con el vapor del evaporador, provocando un gran arrastre y produciendo pérdidas del material. [29]

Este es el caso de la evaporación de la leche de vaca. La leche contiene grasas y proteínas, lo que significa que en su composición también se encuentran sustancias tensoactivas. Estos son compuestos que estabilizan dispersiones de grasas y la formación de burbujas de aire en el agua. Debido a la presencia de tensoactivos en la leche, cuando llega a su punto de ebullición se forman burbujas de agua, que tardan en romperse. En cambio, en el agua estas burbujas se rompen de forma inmediata. [36]

Por esto, durante la ebullición de la leche, se produce la formación de la espuma que, por su baja densidad, es arrastrada por el vapor hacia la salida. Cuando es un evaporador de simple efecto sale por la parte superior del equipo junto con el vapor formado para ser condensado y desechado. Sin embargo, cuando es un evaporador de múltiples efectos puede ser dañino para el siguiente efecto, ya que el vapor fluirá junto con los sólidos que ha arrastrado. [20]

2.3.4 Presión y temperatura

La presión del sistema incide en el punto de ebullición de la solución que será evaporada. La temperatura de ebullición y la presión son

directamente proporcionales, lo que significa que mientras más incrementa la presión de operación, mayor será la temperatura de ebullición de la solución. Esta temperatura también aumenta a medida que la solución va ganando sólidos, es decir, a medida que se va concentrando. Para bajar el punto de ebullición se recomienda trabajar a presiones por debajo de 1 atm, lo que significa trabajar en un sistema de vacío. [21]

2.3.5 Materiales de construcción

De ser posible, los evaporadores deben construirse con algún tipo de acero para evitar la corrosión y el daño del material. Esto se debe a que existen soluciones que atacan los metales ferrosos para los cuales se deberá elegir el material adecuado que puede ser cobre, níquel, acero inoxidable, plomo, aluminio o grafito. Estos materiales suelen ser costosos, por lo que es necesario tener una velocidad de transferencia de calor elevada, para que la evaporación se produzca de manera más rápida. [29]

2.3.6 Incrustaciones

Las incrustaciones son materiales sólidos de las soluciones que se depositan sobre la superficie de calentamiento, formadas debido a la disminución en la solubilidad o por la descomposición de ciertos componentes de la alimentación. La formación de incrustaciones provoca una reducción del coeficiente de calor debido a que el área de transferencia de calor se reduce, al tener material sólido sobre esta. Para evitar este problema se debe elegir el material adecuado del equipo, teniendo en cuenta los compuestos de la solución que se desean evaporar, evitando la corrosión y disminuyendo la necesidad de mantenimiento del equipo. [21]

2.4 Principios de la evaporación

Las moléculas de agua se encuentran en continuo movimiento. La velocidad de las moléculas y la temperatura son directamente proporcionales, lo que significa que si una aumenta la otra también lo hará. De esta manera, se incrementa su energía cinética hasta lograr que algunas moléculas se liberen y atraviesen la interface líquido-gas, para convertirse en vapor. [38]

La evaporación se basa en la transferencia simultánea de calor y masa. La cantidad de calor que se debe aplicar al proceso es grande, ya que debe suministrarse el calor latente de vaporización del disolvente (generalmente agua) para lograr obtener una solución rica en soluto. [18]

Debido a esto, la transferencia de calor es uno de los factores más importantes en el diseño y la construcción de un evaporador. La superficie de calentamiento es la parte que representa el mayor costo en la construcción, además de ser la más importante, ya que es uno de los factores que definen el rendimiento del equipo. [1]

2.4.1 Transferencia de masa

En la transferencia de masa, uno o más componentes de una mezcla se transfieren de diferentes regiones de la misma que se encuentran a distintas concentraciones. De esta manera, la diferencia de concentraciones de los componentes de la mezcla es la fuerza impulsora de esta operación. [5]

Cuando la solución concentrada alcance su saturación, la transferencia de masa cesará. [12]

La transferencia de masa en la evaporación ocurre de la siguiente manera:

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

F: Solución de alimentación (kg/h)

L: Solución concentrada (kg/h)

V: Vapor extraído de la solución (kg/h)

2.4.2 Transferencia de calor

La vaporización de líquidos se debe a diversos mecanismos de transmisión de calor que se pueden dar por separado o en combinación. El calor se puede absorber ya sea por convección, conducción o radiación, o también más de uno de estos mecanismos a la vez. En los evaporadores la transferencia de calor se da por convección. [32]

La convección es la transferencia de calor debido al movimiento de las moléculas de un fluido. Este fenómeno se produce debido a que interviene un fluido (gas o líquido) que transporta calor entre dos zonas a

diferente temperatura, ya sea de manera forzada o natural, que permite que las partículas se desplacen. [23]

El cálculo del calor transferido al evaporador se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$Q = S\lambda \quad (Ec. 2.2)$$

Donde:

Q: Calor transferido al evaporador (kcal/h)

S: Vapor de agua (kg/h)

λ : Calor latente del vapor de agua (kcal/kg)

2.4.3 Coeficiente global de transferencia de calor

El calor transferido al evaporador sirve para poder calcular el coeficiente global de transferencia de calor, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U.A.\Delta T \quad (Ec. 2.3)$$

Donde:

Q: Cantidad de calor transferido al evaporador (kJ/h)

U: Coeficiente global de transferencia de calor (kJ/h.m².°C)

A: Área superficial de transferencia de calor (m²)

ΔT: Diferencia útil de temperatura (°C)

El coeficiente global de transferencia de calor depende de las propiedades de la solución, el medio de calentamiento, la geometría del equipo y la superficie de calentamiento. Las propiedades de la solución se determinan cuando se eligen los componentes con los que se va a trabajar y sus concentraciones, además de la presión de operación adecuada. Las condiciones de la superficie abarcan el tipo y espesor del material que se utilizó, además de su limpieza y uniformidad. [18]

4.2.4 Balance de energía

Para lograr obtener el coeficiente global de transferencia de calor, se deben realizar los cálculos respectivos con la ecuación de balance de calor:

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (Ec. 2.4)$$

Donde:

h_F : Entalpía específica de la alimentación (kcal/kg)

λ_S : Calor latente del vapor de agua (kcal/kg)

h_L : Entalpía específica del líquido concentrado (kcal/kg)

h_V : Entalpía específica del vapor de la solución (kcal/kg)

El calor latente del vapor de agua y la entalpía del vapor de la solución se determinan por medio de tablas de vapor de agua (Apéndice B). Los valores de las entalpías de alimentación y del líquido concentrado se obtienen de fórmulas conociendo previamente los calores específicos de las sustancias:

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Donde:

cp_F : Calor específico de la alimentación (kJ/kg°C)

T_F : Temperatura de la alimentación (°C)

cp_L : Calor específico del líquido concentrado (kJ/kg°C)

T_1 : Temperatura de ebullición de la solución (°C)

T_{Ref} : Temperatura de referencia, generalmente 0°C

Para los cálculos de los calores específicos de la solución azucarada se utiliza la fórmula:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

Donde:

Cp_i : Calor específico de la solución azucarada (KJ/kg °C)

Cp_{agua} : Calor específico del agua a la temperatura de la solución
(KJ/kg °C)

X_i : Fracción en masa de azúcar

Para obtener el calor específico de la leche de vaca se debe utilizar una ecuación distinta, siendo esta: [15]

$$cp_i = 4.184(2.686C) \quad (Ec. 2.8)$$

Donde:

Cp_i : Calor específico de la solución azucarada (KJ/kg °C)

C : Concentración (°Brix)

2.4.5 Elevación del punto de ebullición (EPE)

La presión de vapor de las soluciones acuosas es, por lo general, menor a la del agua a una misma temperatura. Por esto, a una presión ya determinada, la temperatura de ebullición de una solución va a ser mayor que la del agua. Esta diferencia entre ambas se conoce como la elevación del punto de ebullición EPE. Para soluciones diluidas, es un valor pequeño. [29]

La elevación del punto de ebullición de una solución que contiene un sólido disuelto depende de la concentración del mismo y de la presión hidrostática que tenga la columna del líquido debido a la altura a la que se encuentre. Si las dimensiones del equipo son pequeñas, la elevación del punto de ebullición se desprecia debido a que dará un valor mínimo. En este caso, el equipo está realizado a escala piloto por lo que los EPE no se toman en consideración. [42]

Debido al amplio uso de la evaporación en la industria azucarera, existen nomogramas y ecuaciones de trabajos y autores diferentes para calcular la elevación del punto de ebullición de una solución azucarada. La ecuación de Hugot (1986) para una solución de azúcar y agua determina el EPE tomando en consideración los grados Brix de la solución y la presión de operación. La ecuación es la siguiente: [24]

$$EPE = 0.025B \left(\frac{30+B}{103.6-B} \right) \left(1 - \frac{0.57h}{229-h} \right) \quad (Ec. 2.9)$$

Donde:

B: Concentración másica de sacarosa (°Brix)

h: Vacío al cual se encuentra el fluido (mmHg)

El EPE de la leche de vaca se calcula, en cambio mediante la fórmula:

[20]

$$EPE = 3.5714C^2 + 1.9643C + 0.0393 \quad (Ec. 2.10)$$

Donde C es la concentración de la leche.

2.4.6 Coeficientes de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor entre el vapor de calentamiento y el líquido en ebullición es el resultado de la suma de cinco resistencias individuales:

- Resistencia de la película de vapor
- Son resistencias por incrustaciones (interior y exterior de los tubos)
- Resistencia de la pared del tubo

- Resistencia del líquido en ebullición

De esta manera, el coeficiente global será el inverso de la resistencia total del sistema. Debido a que resulta difícil medir los coeficientes individuales de transferencia de calor, los resultados son expresados por medio del coeficiente global. Estos valores toman en cuenta la caída de temperatura corregida, debido al valor del EPE. [29]

Para que se dé lugar a la transferencia de calor, debe existir una diferencia de temperatura que será la fuerza impulsora. La diferencia útil de temperatura influye fuertemente en el coeficiente global de transferencia de calor [1]. Para calcular el ΔT se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (Ec.2.11)$$

2.4.7 Economía de un evaporador

En la evaporación a simple efecto se toma como base que para evaporar un kilogramo de agua a la temperatura de ebullición de la solución, se necesita 1 kilogramo de vapor aproximadamente. Esta base es una situación ideal, ya que en la práctica no ocurre lo mismo. Generalmente, se necesita más de un kilogramo de vapor de agua para lograr evaporar

un kilogramo de una solución líquida [2]. La economía de un evaporador es la eficiencia del mismo, y se mide con la ecuación:

$$\epsilon = \frac{V}{S} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

E: Economía o eficiencia del evaporador

V: Vapor desprendido de la solución (kg)

S: Vapor de calefacción (kg)

El elemento principal que determina la economía de un evaporador es el número de efectos que se tiene en el sistema. Además, la temperatura con la que ingresa la alimentación también influye en la economía. Este factor se determina por medio de balances de entalpía. [29]

Cuando se necesita evaporar un mayor volumen de alimentación, se necesita mejorar el aprovechamiento energético. Esto lleva al empleo de evaporadores de múltiples efectos, en los cuales se puede observar una mejor economía del vapor. [19]

2.5 Tipos de evaporadores

La clasificación general de los evaporadores se puede realizar de la siguiente manera:

- Marmita abierta o artesa
- Evaporador de tubos horizontales con circulación natural
- Evaporador vertical con circulación natural
- Evaporador vertical de tubos largo
- Evaporador de caída de película
- Evaporador de película agitada

2.5.1 Marmita abierta o artesa

Es la forma más simple de un evaporador, que consiste básicamente en hervir un líquido. El calor proviene de la condensación del vapor en una chaqueta o serpentines sumergidos en el mismo líquido. El costo de estos evaporadores es bajo y se operan de una manera sencilla. Sin embargo, desperdician una alta cantidad de calor. [30]

2.5.2 Evaporador de tubos horizontales con circulación natural

En este evaporador, el banco de tubos de calentamiento es similar al de un intercambiador de calor. El vapor de agua ingresa a los tubos y se condensa, saliendo por el otro extremo. La solución líquida se encuentra por fuera de los tubos. El vapor desprendido de la solución luego pasa por deflectores para salir por la parte superior del equipo. Esto impide el arrastre de gotas del líquido. Este tipo de evaporador se utiliza para líquidos no viscosos con altos coeficientes de calor y para soluciones que no formen incrustaciones. No son adecuados para líquidos viscosos debido a que la circulación del líquido no es la adecuada. [21]

2.5.3 Evaporador vertical con circulación natural

En este evaporador el líquido se encuentra dentro de los tubos dispuestos verticalmente. De esta manera, el vapor se condensa por fuera de los mismos. Por causa de la ebullición y de la disminución de densidad, el líquido se eleva en los tubos por circulación natural, para luego caer a través de un espacio central. Este tipo de circulación causa un coeficiente de transferencia de calor elevado y no es útil para líquidos viscosos. Este tipo de evaporador también es conocido como evaporador de tubos cortos. [21]

2.5.4 Evaporador vertical de tubos largos

Para este evaporador se trabaja con velocidades altas de alimentación. Esto se debe a que el coeficiente de transferencia de calor del vapor es muy elevado, en comparación con el líquido en ebullición. La solución líquida se encuentra dentro de los tubos, que tienen entre 3 a 10 metros de longitud. La formación de burbujas de vapor en el interior de los tubos produce una acción de bombeo, lo que provoca las velocidades altas del líquido. Generalmente, este tipo de evaporador no tiene recirculación. [18]

2.5.5 Evaporador de caída de película

La alimentación ingresa por la parte superior de los tubos y fluye por sus paredes, formando una película delgada. Es una variación del evaporador de tubos largos. La separación del líquido y vapor ocurre en el fondo del evaporador. El tiempo de retención es bajo (5 a 10 segundos), por lo que se recomienda su uso para soluciones que son sensibles al calor. Además, tiene un alto coeficiente de transferencia de calor. [21]

2.5.6 Evaporador de circulación forzada

El coeficiente de transferencia de calor del líquido se eleva para causar la circulación forzada de la solución por el interior de los tubos. En estos sistemas, el líquido que se evapora se bombea a través de un intercambiador de calor. Esto se utiliza para evaporadores con tubos más cortos que los de tubos verticales largos, pero se puede aplicar al añadir una tubería conectada a una bomba entre las líneas de salida de la solución concentrada y de la alimentación. La circulación forzada es útil para líquidos viscosos. [18]

2.5.7 Evaporador de película agitada

La agitación mecánica del líquido ayuda a aumentar su coeficiente de transferencia de calor. Esto se realiza en un evaporador de película agitada, que utiliza un solo tubo grande enchaquetado que tiene un agitador interno. El líquido ingresa por la parte superior del tubo y se dispersa de forma turbulenta debido a la agitación de las aspas, a medida que cae. La solución concentrada sale por debajo del equipo y el vapor por la parte superior. Este método de evaporación es muy útil para materiales muy viscosos, ya que el coeficiente de transferencia de calor

es mayor que en los modelos de circulación forzada. Sin embargo, tiene un alto costo y una capacidad baja. [21]

2.6 Evaporadores de simple efecto

La evaporación de simple efecto ocurre cuando se utiliza un solo evaporador. El vapor que proviene del líquido en ebullición, sale del equipo por la parte superior. Luego, es condensado y desechado. Son conocidos también como evaporadores de un solo paso, debido a que el líquido pasará solo una vez a través de los tubos. [29]

Los evaporadores de simple efecto son utilizados para sistemas con materiales que son sensibles al calor o que pierden sus propiedades a altas temperaturas, debido a que solo hay un paso de la solución por los tubos. El líquido entra y sale rápidamente en forma de concentrado, por lo que no tiene mucho tiempo de exposición a la temperatura de ebullición. [26]

Los evaporadores de simple efecto se utilizan cuando la capacidad necesaria es pequeña. En el Laboratorio de Operaciones Unitarias, el evaporador es de simple efecto y de tubos verticales cortos. Este consiste en un haz de tubos verticales colocados entre dos espejos. [1]

Cuando la capacidad necesaria de producción es grande, se debe aumentar el aprovechamiento del calor, por lo que se utilizan los evaporadores de múltiple efecto. En los evaporadores de múltiple efecto, el vapor generado en un efecto se aprovecha en el siguiente efecto como medio de calentamiento. [19]

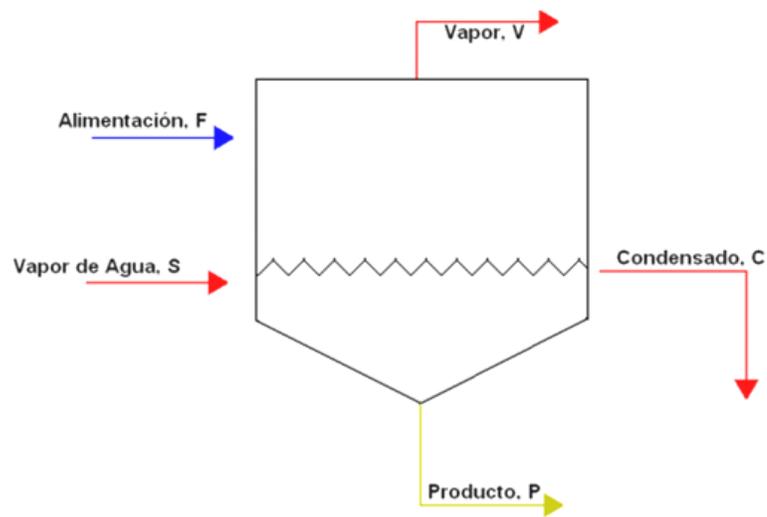


Fig. 2.1. Diagrama de un evaporador de simple efecto

Fuente: Velásquez, M.; Universidad Tecnológica de Pereira. [40]

2.7 Evaporación con sistema de vacío

La evaporación al vacío es la concentración de una disolución sólido-líquido, por medio de su punto de ebullición, trabajando a presiones de operación menores a la presión atmosférica. La evaporación al vacío consiste en reducir la presión

interior de la caldera del evaporador [8]. Se aplicó el sistema de vacío al evaporador mediante una bomba de vacío.

La principal ventaja de trabajar con un sistema de vacío en un evaporador es que se reduce la temperatura del punto de ebullición de la mezcla, por lo que el calor que se debe suministrar al equipo es menor. Esto significa que se evaporará una mayor cantidad del componente volátil debido a la menor presión, aplicando menor cantidad de calor. Se recomienda trabajar con vacío cuando se requiere evaporar sustancias que tienen un elevado punto de ebullición, o que se descomponen a elevadas temperaturas. [9]

Este es el caso de la evaporación de la leche de vaca, en la cual, trabajando atmosféricamente, se llegan a temperaturas que descomponen los nutrientes de la misma, perdiendo su fuente de vitaminas. Debido a esto, a nivel industrial se realiza este proceso con sistema de vacío.

Sin embargo, este proceso no solo presenta ventajas por reducir el costo de energía. El agua después de condensarla tiene una mejor calidad que en un sistema atmosférico. Muchas veces se utiliza el condensado en aplicaciones o procesos luego de la evaporación al vacío. Esto ayuda a la reutilización del agua y vuelve el proceso amigable con el medio ambiente. [4]

Otras ventajas que presenta la evaporación al vacío son:

- Reducción del volumen de residuo líquido
- Concentración de componentes corrosivos
- Reutilización del agua condensada
- Minimizar el mantenimiento requerido
- Se puede trabajar sin reactivos (a excepción de antiespumantes en casos que lo requieran)
- Ahorro energético
- Práctico para tratar bajas cantidades de agua residual

[4]

CAPÍTULO III

MODIFICACIONES DE

LA REINGENIERÍA

3.1 Modificaciones

En este capítulo se exponen las modificaciones realizadas al Evaporador de Simple Efecto ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. También se explican las razones por las cuales se decidieron estos cambios y cómo ayudarán a incrementar la eficiencia del evaporador.

3.2 Reingeniería de la cámara de evaporación

Para que la evaporación tenga una mejor eficiencia es importante colocar un mecanismo de separación de partículas pequeñas de líquido que son arrastradas con el vapor. De esta manera, dichas partículas colisionarían con la obstrucción y regresarían a la fase líquida para ser evaporadas, mejorando la calidad del vapor generado. [35]

Para lograr esto, se agregaron deflectores en el interior del equipo. El material que se eligió para utilizar en los deflectores es el acero inoxidable 304, que ayuda a evitar la corrosión del mismo.

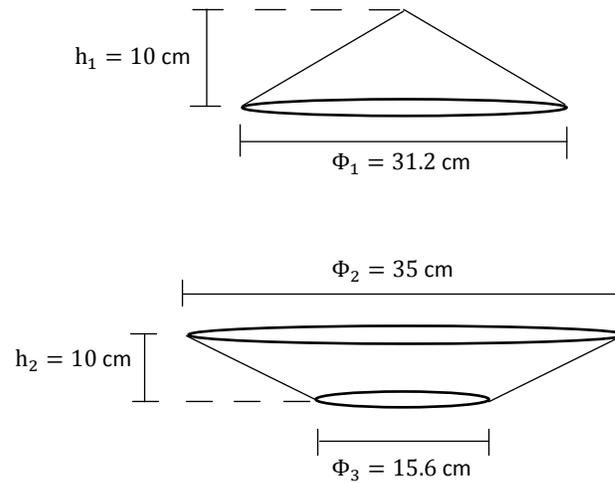


Fig. 3.1. Deflectores del equipo
Fuente: Balseca I. & Flores K., 2016

3.3 Dimensionamiento de la tubería de salida de vapor

Para la elección correcta del diámetro de la tubería de salida de vapor generado en la cámara de evaporación, se requiere conocer el flujo másico de esta, así como la velocidad del vapor que alimenta a la calandria. Una vez conocido esto se procede a calcular el diámetro mediante la siguiente ecuación: [24]

$$D = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right) \times \left(\frac{1.1 \times m}{V \times \rho}\right)} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde

D: Diámetro en in

m : Flujo másico del vapor (kg/h)

V : Velocidad del vapor que ingresa a la calandria (m/s)

ρ : Densidad del vapor a presión de trabajo (kg/m³)

Con ayuda de las prácticas previas realizadas se obtuvieron los flujos y la velocidad requerida, y se procedió a calcular el diámetro el cual dio como resultado 2”.

3.4 Sistema de recirculación

La recirculación es importante para homogenizar el producto [17], por lo que se instaló una bomba marca SIEMENS de alta presión modelo monofásico semiabierto (1RF3 095-2YB99), que permite recircular a presión atmosférica y con presión negativa (vacío). Cabe indicar que la bomba instalada permite recircular a una presión aproximada de -25inHg; en flujo continuo a presión atmosférica y con flujo intermitente en vacío. Además, a la bomba se le instalará una purga para evitar que se quede producto dentro de ella y, de esta manera, evitar pérdidas para los balances de materia.

A continuación se detalla las especificaciones técnicas de la bomba [37]:

Tabla I. Especificaciones de la Bomba SIEMENS

Monofásico Semi-abierto NEMA 56J 2 Polos	
Tipo	1RF3 095-2YB99
Potencia [HP]	1.0
Factor de servicio	1.4
Voltaje [V]	115/230
Corriente nominal [A]	13.0/6.5
Eficiencia η (%)	66.5
Factor de potencia $\text{Cos } \phi$	0.75
Velocidad nominal (rpm)	3520
Torque nominal [Nm]	2.01
Torque de arranque [Nm]	4.2
Corriente de arranque (I_a/I_n)	5.1
Peso neto [kg]	12.5
Condensador de arranque [μF]	340-408

Fuente: SIEMENS (2015), Motores monofásicos [37]

3.5 Sistema de Vacío

El sistema de vacío está constituido con los siguientes equipos:

- Tanque del Condensado
- Tanque de protección para la bomba de vacío
- Bomba de vacío

3.4.1 Tanque del condensado

Con la finalidad de provocar vacío en todo el sistema, es necesario colocar un recipiente hermético que reciba el condensado del vapor desprendido del evaporador; desde dicho tanque se procederá a hacer vacío.

Para el dimensionamiento del recipiente es necesario realizar unos cálculos sencillos, que involucran el volumen del condensado en una hora de práctica que normalmente se lleva a cabo en la cátedra de la materia de Operaciones Unitarias. Y mediante la siguiente ecuación del cilindro se procede a obtener tanto el diámetro como la altura que dicho tanque va a tener:

$$V_{cilindro} = \pi \frac{D^2}{4} h \quad (Ec. 3.2)$$

Donde:

D: Diámetro

h: Altura

En función del volumen del condensado se establece la altura del depósito, y en función de éste el diámetro. Se toma en cuenta un margen de seguridad del 10%. [28]

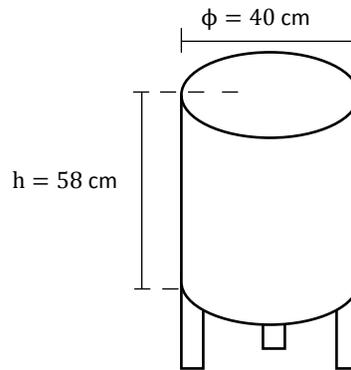


Fig. 3.2. Tanque del condensado

Fuente: Balseca I. & Flores K., 2016

El material utilizado para la construcción del tanque de condensado es el acero inoxidable, para evitar la corrosión que se podría producir.

3.4.2 Tanque de protección para la bomba de vacío

El diseño de este tanque, construido con acero inoxidable, se basa en proteger la bomba de vacío si se llegara a condensar la humedad del aire.

Este tanque consta de una purga, la entrada del aire que sale del recipiente del condensado y la salida de aire a la bomba de vacío.

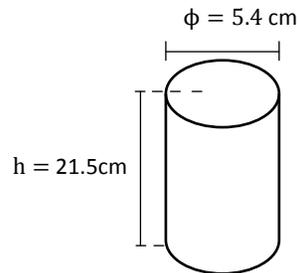


Fig. 3.3. Tanque de protección para la bomba de vacío
Fuente: Balseca I. & Flores K., 2016

3.4.3 Bomba de vacío

Con la colocación de esta bomba se pretende incrementar la eficiencia del equipo ya que, al operar a presión negativa (vacío), la diferencia de temperatura entre el agente calefactor y el líquido que será evaporado aumenta, debido a que disminuye la temperatura de ebullición en comparación a un sistema que trabaja a presión atmosférica. [8]

De esta manera, al ser mayor la diferencia de temperatura, la velocidad de evaporación también será mayor.

El equipo podrá funcionar tanto a presión atmosférica como a vacío, de manera que los estudiantes podrán realizar prácticas con ambos sistemas y comparar la diferencia entre ellas.

Tabla II. Especificaciones de la Bomba de Vacío

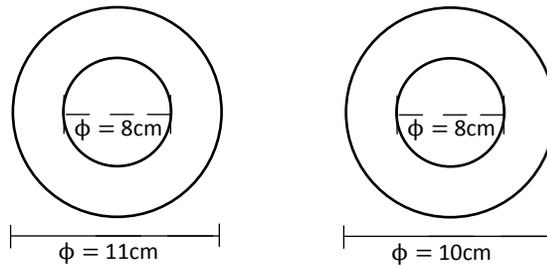
mitsubishi 200w 4 Polos	
Tipo	SC-KR
Potencia [HP]	1/3
Voltaje [V]	110/220
Corriente nominal [A]	5.8/2.9
Velocidad nominal (rpm)	1440
Peso neto [kg]	7.6

Fuente: Mitsubishi Electronic Corporation

3.5 Sistema de inspección

Este sistema consta de dos visores y un foco LED de 8 watts, el cual nos ayudará a ver lo que sucede dentro del equipo cuando esté en funcionamiento.

Las dimensiones del vidrio de los visores son: $\phi=8\text{cm}$; Espesor=1cm

**Fig. 3.4.** Dimensión de los Visores

Fuente: Balseca I. & Flores K., 2016

3.6 Accesorios y tuberías

Para mejorar el control de los parámetros como presión, temperatura y flujos, se agregaron accesorios al sistema del evaporador. Además, debido al desgaste de las tuberías anteriores se decidió cambiarlas.

3.6.1 Termómetros

Se agregaron 3 termómetros de marca DURAC al sistema de evaporación. Los 3 marcan la temperatura tanto en °C como en °F. El primer termómetro asume la función de leer la temperatura de salida del líquido concentrado y tiene un rango de 0 a 250°F. Está ubicado en la tubería de salida del producto.

El segundo termómetro lee la temperatura dentro del evaporador y tiene un rango de 50 a 500°F. Sirve para verificar la temperatura dentro del equipo y lograr ver el punto de ebullición de la solución. Cuando se trabaja en vacío, se puede apreciar la disminución de la temperatura de ebullición.

Por último, el tercer termómetro se utiliza para leer la temperatura de salida del líquido refrigerante del condensador y tiene un rango de 50 a 500 °F. Este termómetro nos ayuda a evitar que eleve la temperatura del

líquido condensado. Cuando es mayor de 50 °C, se aumenta el flujo del refrigerante para bajar la temperatura.

3.6.2 Vacuómetro

En las modificaciones realizadas al evaporador se agregó un vacuómetro marca Winters, que tiene un rango de -30 a 30 inHg. Está ubicado entre los deflectores del evaporador, por fuera del equipo. Este accesorio nos ayuda a verificar la presión del sistema dentro del evaporador. Cuando se trabaja en vacío, se puede observar cómo cae la presión a valores negativos.

3.6.3 Rotámetro

Se adicionó un rotámetro marca Darhor para controlar el flujo del agua refrigerante del condensador. El rango del rotámetro es de 0.25 a 2.5 m³/h. Si la temperatura del condensado se eleva, se debe suministrar un mayor flujo de líquido refrigerante.

3.6.4 Válvulas

Para tener un mejor control del equipo, sus flujos y purgas, se agregaron 18 válvulas de diferentes tipos. En el ingreso de vapor se añadió una válvula reguladora de presión marca TL, para poder lograr una presión constante del sistema. Puede trabajar hasta una temperatura máxima de 220 °C entre 0.2 a 4 kg/cm².

Además, se añadieron 17 válvulas de esfera en todo el sistema de tuberías del equipo. Se eligió este tipo de válvulas ya que son de rápida apertura. Sirven para controlar los flujos tanto de ingresos al equipo como de salidas y para realizar purgas a las tuberías del sistema. También, nos permiten extraer la solución durante las pruebas experimentales, para poder medir la concentración durante el tiempo.

Por último, se agregó una válvula de purga de la bomba de recirculación para eliminar todo líquido que obstruye la tubería y la bomba.

3.6.5 Tuberías

Se cambió completamente el sistema de tuberías del equipo original, exceptuando la salida del alimento. Las tuberías añadidas son de acero inoxidable y galvanizadas, tanto para el flujo del líquido y vapor, y son de

media pulgada de diámetro. También, se colocaron tuberías de plástico en el tanque de alimentación con un diámetro de media pulgada, que se utilizan solo para evacuar el alimento que no se ha utilizado por debajo del tanque.

3.7 Panel de control

Se cambió el panel de control del equipo original por uno nuevo, debido a que se aumentaron la cantidad de conexiones eléctricas del equipo. Además de la bomba original, ahora se tienen dos bombas más (recirculación y vacío). También, se agregó un foco LED de 8 watts para tener visibilidad dentro del equipo. Debido a esto, se eligió un panel de control para 4 conexiones eléctricas.

CAPÍTULO IV

MANUAL DE OPERACIÓN DEL

EVAPORADOR

4.1 Simbología del equipo

Tabla III. Simbología del Evaporador de simple efecto

Simbología	Descripción
V-01	Válvula de alimentación a la bomba
V-02	Válvula de alimentación al evaporador
V-03	Válvula para el reflujó del alimento
V-04	Válvula inferior del nivel de la solución en el evaporador
V-05	Válvula superior del nivel de la solución en el evaporador
V-06	Válvula de purga del vapor procedente de la caldera
V-07	Válvula de ingreso del vapor procedente de la caldera
V-08	Regulador de presión del flujo de vapor procedente de la caldera
V-09	Válvula de purga de la calandria
V-10	Válvula de ingreso del líquido refrigerante
V-11	Válvula de evacuación del tanque del condensado
V-12	Válvula de alivio del tanque del condensado
V-13	Válvula para la extracción del aire (crear vacío al sistema)
V-14	Válvula de ingreso de la solución a la bomba de recirculación
V-15	Válvula de ingreso de la solución desde la bomba de recirculación al evaporador
V-16	Válvula toma muestra de la solución
V-17	Válvula de evacuación de producto
V-18	Válvula de purga de la bomba de recirculación
V-19	Válvula de purga del tanque de alimentación
V-20	Válvula de alivio del tanque de protección para la bomba de vacío
V-21	Válvula de purga del condensado que se forma al extraer el aire húmedo del sistema ubicado en el tanque de protección para la

	bomba de vacío
TR-01	Trampa de vapor del condensado de la calandria
N-01	Nivel de la solución en el evaporador
P-01	Bomba de alimentación
P-02	Bomba de vacío
P-03	Bomba de recirculación
TK-01	Tanque de alimentación
TK-02	Tanque del condensado
TK-03	Tanque de protección para la bomba de vacío
C-01	Condensador
T-01	Termómetro para el vapor generado en el evaporador
T-02	Termómetro para el producto
T-03	Termómetro para el flujo de salida del líquido refrigerante
M-01	Manómetro para flujo de vapor procedente de la caldera
M-02	Vacuómetro
R-01	Medidor de flujo del líquido refrigerante

Fuente: Balseca I., Flores K., 2016

4.2 Identificación de riesgos

A continuación se identifican los principales Riesgos y Seguridad en el manejo del Evaporador Vertical de Tubos Cortos de Simple Efecto.

Tabla IV. Riesgos en la operación del Evaporador

Riesgo	Identificación	Descripción
Físico	Falta de uso de EPPs	<p>Para prevenir accidentes laborales, es de uso obligatorio los elementos de protección personal, caso contrario el equipo no puede ser operado. [25]</p>  <p>[34]</p>
	Quemadura por altas temperaturas	<p>La manipulación del producto obtenido del evaporador, el vapor que ingresa a la calandria y el equipo en sí, sin las debidas protecciones podrían causar quemaduras hasta de segundo grado debido a temperaturas elevadas</p>  <p>[34]</p>
	Descargas	Al exponer a las bombas y la caja de

	eléctricas	control a condiciones de humedad podría conllevar a una descarga eléctrica x la inadecuada manipulación de los equipos.  [34]
Biológicos	Propagación de enfermedades transmitidas por insectos	La limpieza impropia de los tanques o la acumulación de agua estancada en ellos ocasionan que insectos se proliferen de manera rápida provocando severos problemas en la salud.
Ergonómicos	Esfuerzos físicos	El traslado de los recipientes del producto y condensado tanto de la calandria como del vapor generado de la solución, pueden causar lesiones óseas o musculares.

4.3 Materiales, equipos y sustancias

Equipos

- Refractómetro

Materiales

- Vaso de precipitación

- Balanza
- 3 recipientes plásticos (baldes)
- Pisseta

Sustancias

- Solución azucarada
- Agua destilada

4.4 Preparación de la solución

1. Preparar una Solución azucarada con una concentración deseada y tomar su respectiva temperatura.
2. Verificar que la Válvula V-19 se encuentra cerrada.
3. Colocar la solución en el tanque de alimentación TK-01.

4.5 Puesta en marcha del equipo

4.5.1 Sistema a presión atmosférica

1. Verificar la disponibilidad del agua, vapor y electricidad.
2. Asegurar que las válvulas V-02, V-03, V-06, V-07, V-09, V-11, V-13, V-14, V-15, V-16, V-17, V-18, se encuentren cerradas y V-01, V-04, V-05, V-12 se encuentren abiertas.

3. Colocar un recipiente a la salida del condensado de la calandria y otro en la salida del producto.
4. Encender el foco, para iluminar el interior del evaporador.
5. Abrir las válvulas V-02 y V-03 y proceder a prender la bomba P-01. Controlar el nivel de la solución.
6. Una vez alimentado el evaporador, cerrar las válvulas V-02 y V-03.
7. Abrir la válvula V-06 para purgar el agua retenida en la tubería de ingreso del vapor procedente de la caldera.
8. Abrir la válvula V-07 y colocar la presión a la que se quiera trabajar mediante el regulador de presión V-08, verificar dicha presión con el manómetro M-01.
9. Purgar la calandria abriendo la válvula V-09.
10. Abrir la válvula de ingreso del refrigerante V-10, y colocarlo a un flujo deseado de tal manera que la salida del refrigerante tenga una temperatura igual o menor a 45°C.
11. Registrar cada 5 minutos, las temperaturas T-01, T-02, T-03 y la temperatura del condensado de la calandria.

4.5.2 Sistema a presión negativa (vacío)

- 1.** Verificar la disponibilidad del agua, vapor y electricidad.
- 2.** Abrir las válvulas V-20 y V-21 para purgar el tanque, una vez realizado esto cerrarlas.
- 3.** Asegurar que las válvulas V-02, V-03, V-04, V-05, V-06, V-07, V-09, V-11, V-12, V-14, V-15, V-16, V-17, V-18 y V-01, V-13 se encuentren abiertas.
- 4.** Colocar un recipiente a la salida del condensado de la calandria y otro en la salida del producto.
- 5.** Encender el foco, para iluminar el interior del evaporador.
- 6.** Prender la bomba P-02 hasta que alcance el vacío (-20 a -22inHg).
- 7.** Mediante el vacío proceder a alimentar el evaporador abriendo la válvula V-02 (controlar el nivel de la solución mediante la mirilla de inspección).
Una vez terminada la alimentación cerrar las válvulas V-01 y V-02.
- 8.** Abrir la válvula V-06 para purgar el agua retenida en la tubería de ingreso del vapor procedente de la caldera.
- 9.** Abrir la válvula V-07 y colocar la presión a la que se quiera trabajar mediante el regulador de presión V-08, verificar dicha presión con el manómetro M-01.
- 10.** Purgar la calandria abriendo la válvula V-09.

11. Abrir la válvula de ingreso del refrigerante V-10, y colocarlo a un flujo deseado de tal manera que la salida del refrigerante tenga una temperatura igual o menor a 45°C.
12. Registrar cada 5 minutos, las temperaturas T-01, T-02, T-03 y la temperatura del condensado de la calandria.

4.6 Toma de muestra de la solución

1. Simultáneamente abrir las válvulas V-14 y V-15, y prender la bomba P-03.
2. Dejar un minuto encendido la recirculación antes de llegar a los 5 minutos de toma de muestra.
3. A los 5 minutos tomar la muestra de la solución concentrada con un vaso de precipitación, abriendo la válvula V-16 y a la vez cerrando la válvula V-16 hasta que tenga una apertura de 45°.
4. Apagar la bomba P-03 y cerrar las válvulas V-14 y V-15.
5. Realizar este procedimiento cada 5 minutos hasta obtener la solución con la concentración deseada.

4.7 Parada del equipo

4.7.1 Sistema a presión atmosférica

1. Cerrar la válvula V-07.
2. Abrir las válvulas V-17 y V-11 para evacuar el producto y el condensado generado del vapor de la solución.
3. Proceder a pesar el producto, el condensado generado del vapor de la solución y el condensado de la calandria.
4. Abrir la válvula V-18 para purgar la bomba de recirculación. Pesar la solución recolectada de la purga.
5. Abrir la válvula V-19 (purga del tanque de alimentación).
6. Apagar el foco LED de 8W
7. Asegurar dejar las válvulas cerradas.

4.7.2 Sistema a presión negativa (vacío)

1. Cerrar la válvula V-07.
2. Abrir la válvula V-12 para eliminar el vacío.
3. Abrir las válvulas V-17, V-11 y V12 para evacuar el producto y el condensado generado del vapor de la solución.
4. Proceder a pesar el producto, el condensado generado del vapor de la solución y el condensado de la calandria.

5. Abrir la válvula V-18 para purgar la bomba de recirculación. Pesar la solución recolectada de la purga.
6. Abrir la válvula V-19 (purga del tanque de alimentación).
7. Apagar el foco LED de 8W
8. Abrir las válvulas V-20 y V-21 para purgar el tanque de protección para la bomba de vacío.
9. Asegurar dejar las válvulas cerradas.

CAPÍTULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1 Experimentación

En este capítulo se detallarán las pruebas experimentales realizadas luego de las modificaciones hechas al equipo. Se incluyen los cálculos matemáticos y resultados de cada una de las prácticas realizadas. Además, se agregará una prueba previa a la reingeniería, hecha con el fin de evaluar el equipo original y poder comparar resultados. Estas pruebas fueron realizadas con una solución de agua azucarada como alimentación. Adicionalmente, se hizo la experimentación luego de la reingeniería con leche entera, para obtener leche evaporada.

5.2 Prueba experimental del equipo original

Se llevó a cabo una prueba con el evaporador de simple efecto original ubicado en LOPU, para evaluar su eficiencia actual y poder comparar resultados luego de la reingeniería. La prueba experimental fue realizada con una solución de agua azucarada como alimentación, con una concentración de 13%. Se trabajó a 30 psig, presión a la que la caldera enviaba el vapor anteriormente.

Tabla V. Datos obtenidos en la prueba inicial

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	30	43	-	41	0.13	7.5	-	1158	33.25
5			98		0.13		0.14		
10			98		0.13		0.15		
15			98		0.13		0.16		
20			98		0.13		0.19		
25			96		0.13		0.23		
30			96		0.13		0.25		
35			96		0.13		0.28		
40			96		0.13		0.31		
45			96		0.13		0.37		
50			96		0.13		0.48		
55			96		0.13		0.66		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

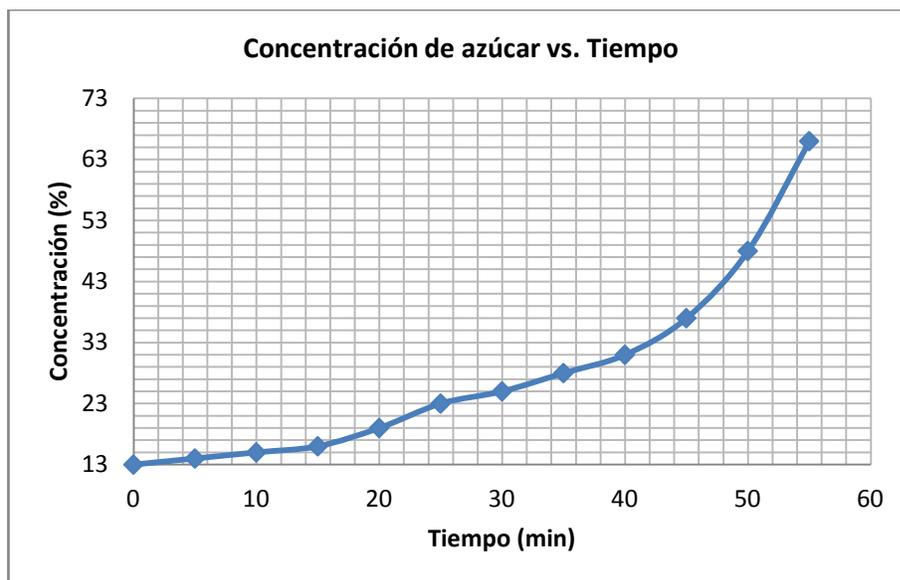


Gráfico 5.1 Concentración vs Tiempo de la prueba inicial

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

A continuación, se procede a realizar los cálculos de la prueba inicial, para determinar: el coeficiente global de transferencia de calor, cantidad de calor suministrada a la calandria, concentración final y la eficiencia.

Se tienen los siguientes datos experimentales:

Tiempo de operación= 55 min = 0.92 horas

Presión de vapor= 30 psig

Concentración inicial= 13%

Tamaño del lote= 41 kg

$$P = 30 + 14.7 = 44.7 \text{ psi} \rightarrow T = 134^{\circ}\text{C}; \lambda = \frac{516 \text{Kcal}}{\text{kg}} =$$

$$\frac{2156 \text{KJ}}{\text{kg}} \text{ (Tabla de vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados

$$h_v = 2675.6 \text{KJ/kg} \rightarrow T = 100^{\circ}\text{C} \text{ (Tabla de vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$L = 7.5 \text{ kg}$$

$$F = 41.0 \text{ kg}$$

$$S = 43.0 \frac{\text{kg}}{0.92 \text{ h}} = 46.9 \text{ kg/h}$$

$$V = 33.35 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{33.35 \text{ kg}}{43.0 \text{ kg}} \times 100 = 77\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 46.9 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 101136 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Cálculo de la elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE = 0.025B \left(\frac{30 + B}{103.6 - B} \right) \left(1 - \frac{0.54h}{229 - h} \right) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Como no existe vacío la operación se realiza a presión atmosférica, entonces:

$$B = 0.13$$

$$h = 76 \text{ cm Hg}$$

$$EPE = 0.025(0.013) \left(\frac{30 + 0.13}{103.6 - 0.13} \right) \left(1 - \frac{0.54(76)}{229 - 76} \right)$$

$$EPE = 0.000693 \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 100^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 134 - 100 = 34^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{101136}{(1.2)(34)} = 2479 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{41.0(0.13)}{0.66} = 8.1 \text{kg}$$

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$V = 41.0 - 8.1 = 32.9 \text{kg}$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El cp del agua a 25°C y 92°C es de 4.179 y 4.207 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$cp_F = 4.180(1 - (0.55 \times 0.13))$$

$$cp_F = 3.88 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$cp_L = 4.207(1 - (0.55 \times 0.66))$$

$$cp_L = 2.68 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(25 - 0)$$

$$h_F = 97.0 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 2.68(92 - 0)$$

$$h_L = 246.5 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(41.0)(97.0) + S(2156) = (8.1)(246.5) + (32.9)(2675.6)$$

$$S = \frac{39.9 \text{ kg}}{0.92 \text{ Horas}} = 43.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 43.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} = 93933 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|93933 - 101136|}{93933} \times 100 = 7.7\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{93933}{(1.2)(34)} = 2302 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|2302 - 2479|}{2302} \times 100 = 7.7\%$$

Tabla VI. Resumen de la prueba inicial

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	41.0	41.0	-
Producto L (kg)	7.5	8.1	7.1
Vapor V (kg)	33.25	32.90	1.0
Steam S (kg/h)	46.9	43.6	7.7
Calor requerido Q (kJ/h)	101136	93933	7.7
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	2479	2302	7.7
Eficiencia (%)	77.3	82.4	6.2
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.13	0.13	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.66	0.66	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3 Pruebas experimentales luego de la reingeniería

5.3.1 Prueba No.1 atmosférica a 5 psig

Tabla VII. Datos de la prueba No.1 atmosférica a 5 psig

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	5	21	-	25	0.10	8	-	1000	16.5
5			97		0.10		0.13	1000	
10			97		0.10		0.15	1000	
15			96		0.10		0.18	1000	
20			97		0.10		0.22	1000	
25			96		0.10		0.25	1000	
30			96		0.10		0.30	1000	

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

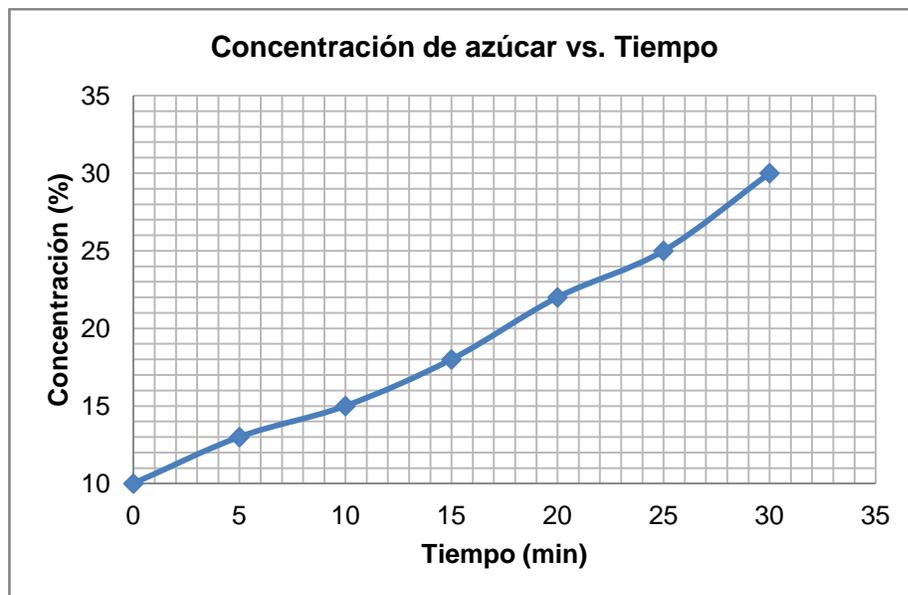


Gráfico 5.2 Concentración vs tiempo de la prueba No.1 a 5 psig atmosférica

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 30 min = 0.5 horas

Presión de vapor= 5 psig (Sistema a Presión atmosférico)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 5 + 14.7 = 19.7 \text{ psi} \rightarrow T = 109^{\circ}\text{C} ; \lambda = 533.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2229.6 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2675.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 100^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$L = 8.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 21.0 \frac{\text{kg}}{0.5\text{h}} = 42.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 16.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{16.5 \text{ kg}}{21.0 \text{ kg}} \times 100 = 78.6\% \text{ (Ec. 2.12)}$$

$$Q_{Pr\acute{a}ctico} = S\lambda = 42 \frac{kg}{h} \times 2229.6 \frac{KJ}{kg} = 93642 \frac{KJ}{h} \quad (Ec. 2.2)$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^{\circ}C \rightarrow t_{eb} = 100^{\circ}C$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (Ec. 2.11)$$

$$\Delta t_m = 109 - 100 = 9^{\circ}C$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (Ec. 2.3)$$

$$U = \frac{93642}{(1.2)(9)} = 8671 \frac{Kcal}{h m^2 C}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.30} = 8.3kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 8.3 = 16.7kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El cp del agua a 26°C y 96°C es de 4.179 y 4.211 $\text{KJ/kg } ^\circ\text{C}$ respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C . [1]

$$cp_F = 4.178(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$cp_F = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$cp_L = 4.211(1 - (0.55 \times 0.30))$$

$$cp_L = 3.52 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.52(96 - 0)$$

$$h_L = 337.6 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (Ec. 2.4)$$

$$(25.0)(102.7) + S(2229.6) = (8.3)(337.6) + (16.7)(2675.6)$$

$$S = \frac{20.1kg}{0.5h} = 40.2 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{teórico} = S\lambda = 40.2 \frac{kg}{h} \times 2229.6 \frac{KJ}{kg} = 89679 \frac{KJ}{h} \quad (Ec. 2.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{teórico} - Q_{práctico}|}{Q_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|89679 - 93642|}{89679} \times 100 = 4.4\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (Ec. 2.3)$$

$$U = \frac{89679}{(1.2)(34)} = 8304 \frac{KJ}{h m^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{teórico} - U_{práctico}|}{U_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|8304 - 8671|}{8304} \times 100 = 4.4\%$$

Tabla VIII. Resumen de la prueba No.1

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	8.0	8.3	4.0
Vapor V (kg)	16.5	16.7	1.0
Steam S (kg/h)	42.0	40.2	4.4
Calor requerido Q (kJ/h)	93642	89679	4.4
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	8671	8304	4.4
Eficiencia (%)	78.6	82.9	5.2
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.30	0.30	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.2 Prueba No.2 atmosférica a 5 psig

Tabla IX. Datos de la prueba No.2 atmosférica a 5 psig

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	5	21.0	-	25.0	0.10	8.0	-	2000	16.5
5			97		0.10		0.12		
10			96		0.10		0.15		
15			97		0.10		0.17		
20			95		0.10		0.20		
25			96		0.10		0.25		
30			96		0.10		0.30		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

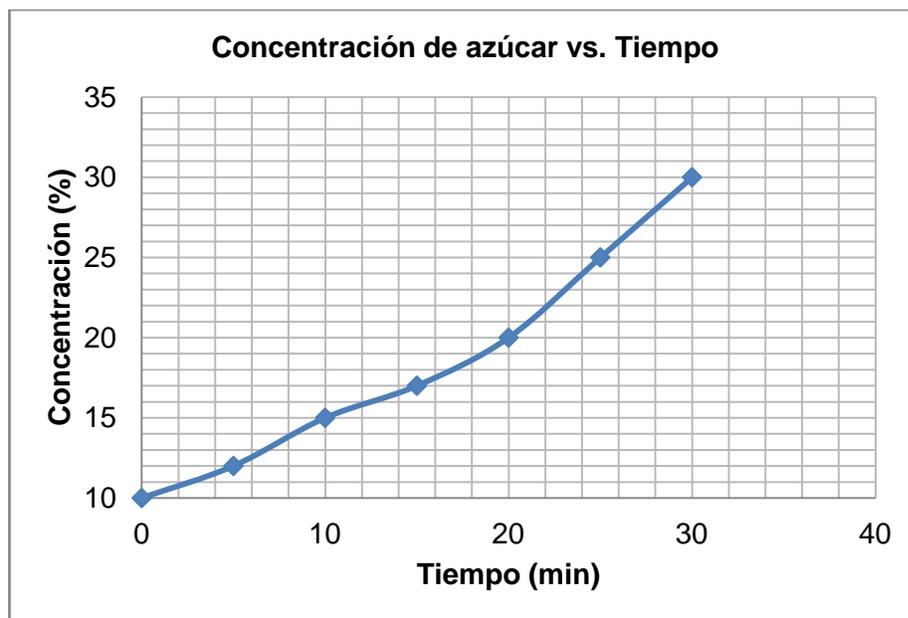


Gráfico 5.3 Concentración vs Tiempo de la prueba No.2 a 5 psig atmosférica

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 30 min = 0.5 horas

Presión de vapor= 5 psig (Sistema a Presión atmosférico)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 5 + 14.7 = 19.7 \text{ psi} \rightarrow T = 109^\circ\text{C}; \lambda = 533.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2229.6 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2675.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 100^\circ\text{C (Tabla vapor saturado. Apéndice B)}$$

$$L = 8.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kgS} = 21.0 \frac{\text{kg}}{0.5\text{h}} = 42.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 16.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{16.5 \text{ kg}}{21.0 \text{ kg}} \times 100 = 78.6\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 42.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2229.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 93642 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 100^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 109 - 100 = 9^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{93642}{(1.2)(9)} = 8671 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.30} = 8.5kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 8.5 = 16.5 \frac{kg}{h}$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El cp del agua a 26°C y 94°C es de 4.179 y 4.209 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$cp_F = 4.179(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$cp_F = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$cp_L = 4.209(1 - (0.55 \times 0.30))$$

$$cp_L = 3.53 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.53(94 - 0)$$

$$h_L = 331.5 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (Ec. 2.4)$$

$$(25)(102.7) + S(2229.6) = (8.5)(331.5) + (16.5)(2675.6)$$

$$S = 19.3kg = 39.9 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{teórico} = S\lambda = 39.9 \frac{kg}{h} \times 2229.6 \frac{KJ}{kg} = 88915 \frac{KJ}{h} \quad (Ec. 2.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{teórico} - Q_{práctico}|}{Q_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|88915 - 93642|}{88915} \times 100 = 5.3\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (Ec. 2.3)$$

$$U = \frac{88915}{(1.2)(34)} = 8233 \frac{KJ}{h m^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{teórico} - U_{práctico}|}{U_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|8233 - 8671|}{8233} \times 100 = 5.3\%$$

Tabla X. Resumen de la prueba No.2

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	8.0	8.5	5.6
Vapor V (kg)	16.5	16.5	0.2
Steam S (kg/h)	42.0	39.9	5.3
Calor requerido Q (kJ/h)	93642	88915	5.3
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	8671	8233	5.3
Eficiencia (%)	78.6	82.9	5.2
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.30	0.30	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.3 Prueba No.3 a 5psig en vacío

Tabla XI. Datos de la prueba No.3 a 5 psig en vacío (22 inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_S (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	5	21.0	-	25.0	0.10	6.0	-	2000	19.0
5			71		0.10		0.15		
10			68		0.10		0.18		
15			70		0.10		0.22		
20			70		0.10		0.24		
25			65		0.10		0.35		
30			70		0.10		0.41		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

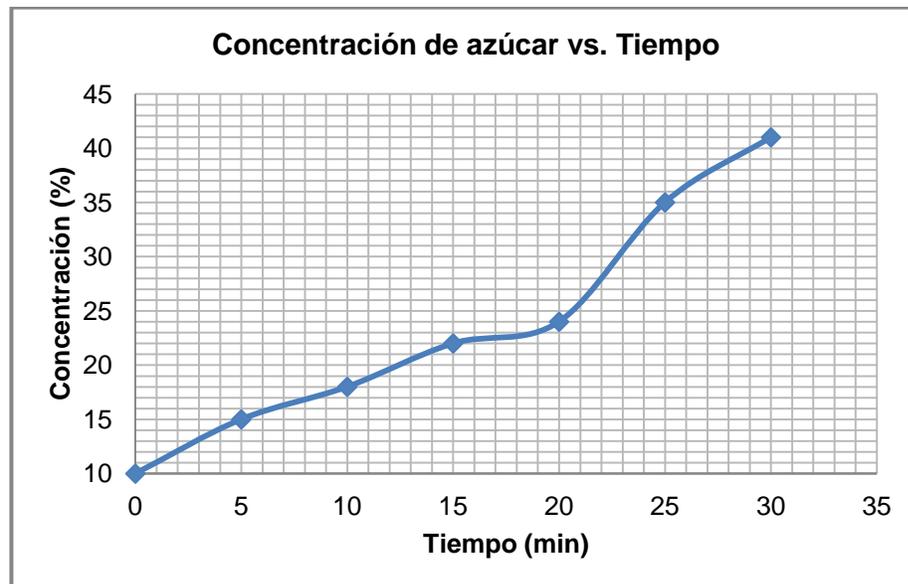


Gráfico 5.4 Concentración vs Tiempo de la prueba No.3 a 5 psig en vacío

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 30 min = 0.5 horas

Presión de vapor= 5 psig (Sistema a Presión negativa)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 5 + 14.7 = 19.7 \text{ psi} \rightarrow T = 109^{\circ}\text{C}; \lambda = 533.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2229.6 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado. Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2333.0 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 70^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacío} = 29.9 \text{ inHg} - 22 \text{ inHg} = 7.9 \text{ inHg} = 20 \text{ cmHg}$$

$$L = 6.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 21.0 \frac{\text{kg}}{0.5 \text{ h}} = 42.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 19.0 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{19.0 \text{ kg}}{21.0 \text{ kg}} \times 100 = 90.5\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 42.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2229.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 93642 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 70^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 109 - 70 = 39^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{93642}{(1.2)(39)} = 2001 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.41} = 6.2kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 6.2 = 18.8kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El c_p del agua a 26°C y 67°C es de 4.179 y 4.188 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.179(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$c_{p_F} = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.188(1 - (0.55 \times 0.41))$$

$$c_{p_L} = 3.26 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.26(67 - 0)$$

$$h_L = 218.1 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(102.7) + S(2229.6) = (6.2)(218.1) + (18.8)(2333.0)$$

$$S = 19.2\text{kg}/0.5\text{h} = 38.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 38.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2229.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 85406 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{diferencia} = \frac{|85406 - 93642|}{85406} \times 100 = 9.6\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{85406}{(1.2)(34)} = 1825 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

$$\% \text{diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|1825 - 2001|}{1825} \times 100 = 9.6\%$$

Tabla XII. Resumen de la prueba No.3

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	6.0	6.2	2.3
Vapor V (kg)	19.0	18.8	0.9
Steam S (kg/h)	42.0	38.3	9.6
Calor requerido Q (kJ/h)	93642	85406	9.6
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	2001	1825	9.6
Eficiencia (%)	90.5	98.3	8.0
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.41	0.41	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.4 Prueba No.4 a 5 psig en vacío

Tabla XIII. Datos de la prueba No.4 a 5 psig en vacío (22 inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	5	20.0	-	25.0	0.10	6.0	-	1500	19.0
5			71		0.10		0.17		
10			70		0.10		0.19		
15			69		0.10		0.23		
20			69		0.10		0.27		
25			70		0.10		0.35		
30			72		0.10		0.41		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

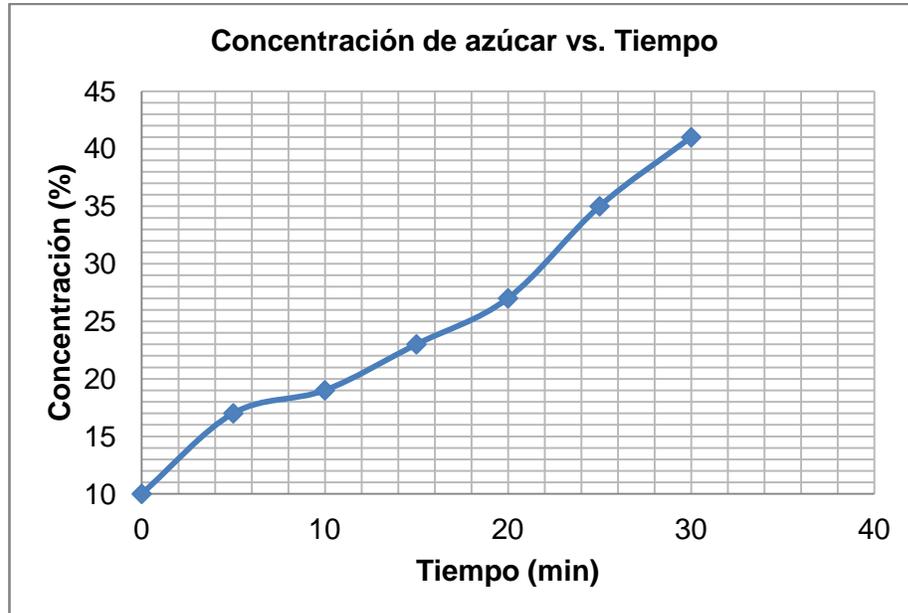


Gráfico 5.5 Concentración vs Tiempo de la prueba No.4 a 5 psig en vacío

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 30 min = 0.5 horas

Presión de vapor= 5 psig (Sistema a Presión negativa)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 5 + 14.7 = 19.7 \text{ psi} \rightarrow T = 109^\circ\text{C}; \lambda = 533.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2229.6 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2333.0 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 70^\circ\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacío} = 29.9 \text{ inHg} - 22 \text{ inHg} = 7.9 \text{ inHg} = 20 \text{ cmHg}$$

$$L = 6.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 20.0 \frac{\text{kg}}{0.5 \text{ h}} = 40.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 18.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{18.5 \text{ kg}}{20.0 \text{ kg}} \times 100 = 92.5\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{Pr\acute{a}ctico} = S\lambda = 40.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2229.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 89183 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 70^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 109 - 70 = 39^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{89183}{(1.2)(39)} = 1906 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.41} = 6.1kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25 - 6.1 = 18.9kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El cp del agua a 25°C y 68°C es de 4.180 y 4.189 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$cp_F = 4.180(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$cp_F = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$cp_L = 4.189(1 - (0.55 \times 0.41))$$

$$cp_L = 3.24 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(25 - 0)$$

$$h_F = 98.8 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.24(68 - 0)$$

$$h_L = 220.6 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(98.8) + S(2229.6) = (6.1)(220.6) + (18.9)(2333.0)$$

$$S = \frac{19.3 \text{ kg}}{0.5 \text{ h}} = 38.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 38.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2229.6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 85952 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|85952 - 89183|}{85952} \times 100 = 3.8\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{85952}{(1.2)(34)} = 1837 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|1837 - 1906|}{1837} \times 100 = 3.8\%$$

Tabla XIV. Resumen de la prueba No.4

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	6.0	6.1	1.6
Vapor V (kg)	18.5	18.9	2.1
Steam S (kg/h)	40.0	38.6	3.8
Calor requerido Q (kJ/h)	89183	85952	3.8
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	1906	1837	3.8
Eficiencia (%)	92.5	98.1	5.7
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.41	0.41	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.5 Prueba No.5 atmosférica a 18 psig

Tabla XV. Datos de la prueba No.5 atmosférica a 18 psig

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	18	23.5	-	25.0	0.10	5.0	-	2375	19.5
5			97		0.10		0.20		
10			97		0.10		0.26		
15			96		0.10		0.41		
20			96		0.10		0.50		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

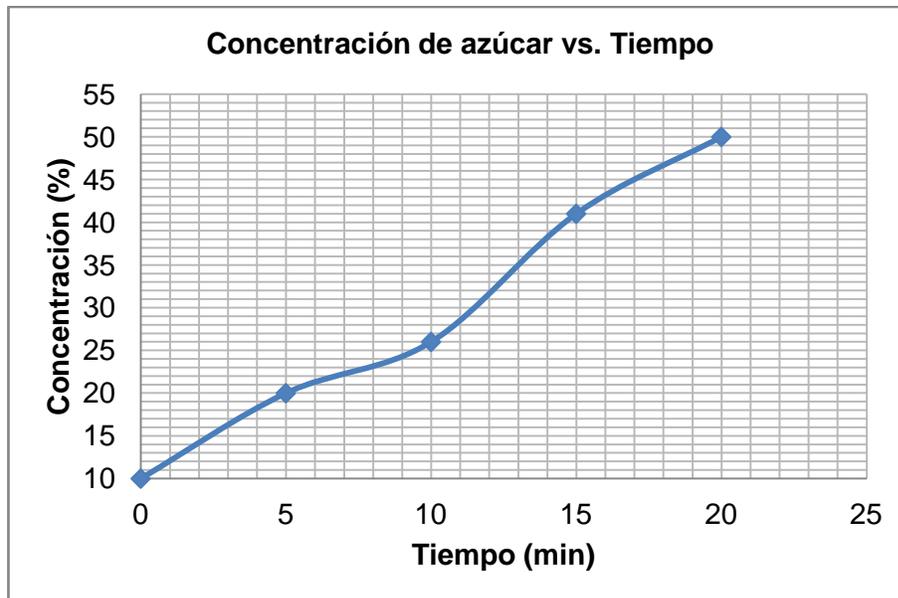


Gráfico 5.6 Concentración vs Tiempo de la prueba No.5 a 18 psig atmosférica

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 20 min = 0.33 horas

Presión de vapor= 18 psig (Sistema a Presión atmosférica)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 18 + 14.7 = 32.7 \text{ psi} \rightarrow T = 124^{\circ}\text{C}; \lambda = 523.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2190.9 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2675.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 100^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$L = 5.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 23.5 \frac{\text{kg}}{0.33\text{h}} = 70.5 \text{ kg/h}$$

$$V = 19.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{19.5 \text{ kg}}{23.5 \text{ kg}} \times 100 = 83.0\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 70.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 154458 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 100^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 124 - 100 = 24^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{154458}{(1.2)(24)} = 5363 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.50} = 5.0kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 5.0 = 20.0kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El c_p del agua a 26°C y 96°C es de 4.179 y 4.211 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.178(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$c_{p_F} = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.211(1 - (0.55 \times 0.50))$$

$$c_{p_L} = 3.05 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.52(96 - 0)$$

$$h_L = 293.1 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(102.7) + S(2190.9) = (5.0)(293.1) + (20.0)(2675.6)$$

$$S = \frac{23.9 \text{ kg}}{0.33 \text{ h}} = 71.8 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 71.8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 157231 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|157231 - 154458|}{157231} \times 100 = 1.8\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{157231}{(1.2)(34)} = 5460 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|5460 - 5363|}{5460} \times 100 = 1.8\%$$

Tabla XVI. Resumen de la prueba No.5

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	5.0	5.0	0
Vapor V (kg)	19.5	20.0	2.5
Steam S (kg/h)	70.5	71.8	1.8
Calor requerido Q (kJ/h)	154458	157231	1.8
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	5363	5460	1.8
Eficiencia (%)	83.0	83.6	0.7
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.50	0.50	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.6 Prueba No.6 atmosférica a 18 psig

Tabla XVII. Datos de la prueba No.6 atmosférica a 18 psig

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	18	23.5	-	25.0	0.10	5.0	-	2250	19.5
5			96		0.10		0.20		
10			96		0.10		0.27		
15			97		0.10		0.41		
20			97		0.10		0.50		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

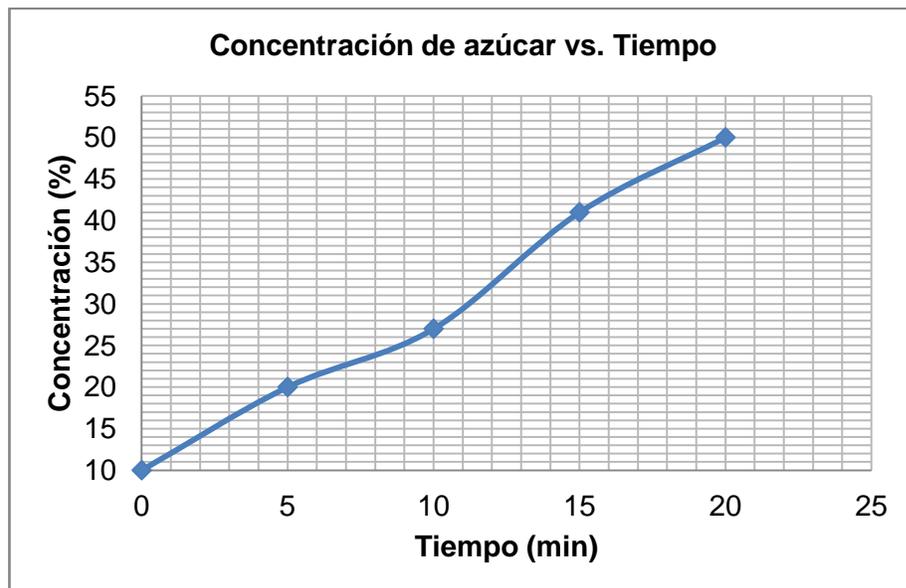


Gráfico 5.7 Concentración vs Tiempo de la prueba No.6 a 18 psig atmosférica

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 20 min = 0.33 horas

Presión de vapor= 18 psig (Sistema a Presión atmosférica)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 18 + 14.7 = 32.7 \text{ psi} \rightarrow T = 124^{\circ}\text{C}; \lambda = 523.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2190.9 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2675.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 100^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$L = 5.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 23.5 \frac{\text{kg}}{0.33\text{h}} = 70.5 \text{ kg/h}$$

$$V = 19.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{19.5 \text{ kg}}{23.5 \text{ kg}} \times 100 = 83.0\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 70.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 154458 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 100^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 124 - 100 = 24^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{154458}{(1.2)(24)} = 5363 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.50} = 5.1kg$$

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$V = 25.0 - 5.1 = 19.9kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

El c_p del agua a 26°C y 96°C es de 4.179 y 4.211 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.178(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$c_{p_F} = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.211(1 - (0.55 \times 0.50))$$

$$c_{p_L} = 3.06 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.52(96 - 0)$$

$$h_L = 294.2 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(102.7) + S(2190.9) = (5.1)(294.2) + (19.9)(2675.6)$$

$$S = \frac{23.9 \text{ kg}}{0.33 \text{ h}} = 71.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 71.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 156887 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|156887 - 154458|}{156887} \times 100 = 1.5\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{156887}{(1.2)(34)} = 5448 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|5448 - 5363|}{5448} \times 100 = 1.5\%$$

Tabla XVIII. Resumen de la prueba No.6

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	5.0	5.1	1.0
Vapor V (kg)	19.5	19.9	2.3
Steam S (kg/h)	70.5	71.6	1.5
Calor requerido Q (kJ/h)	154458	156887	1.5
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	5363	5448	1.5
Eficiencia (%)	83.0	83.6	0.7
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.50	0.50	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.7 Prueba No.7 a 18 psig en vacío

Tabla XIX. Datos de la prueba No.7 a 18 psig en vacío (22 inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	18	23.0	-	25.0	0.10	4.0	-	2375	21.0
5			84		0.10		0.24		
10			85		0.10		0.35		
15			85		0.10		0.54		
20			95		0.10		0.61		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

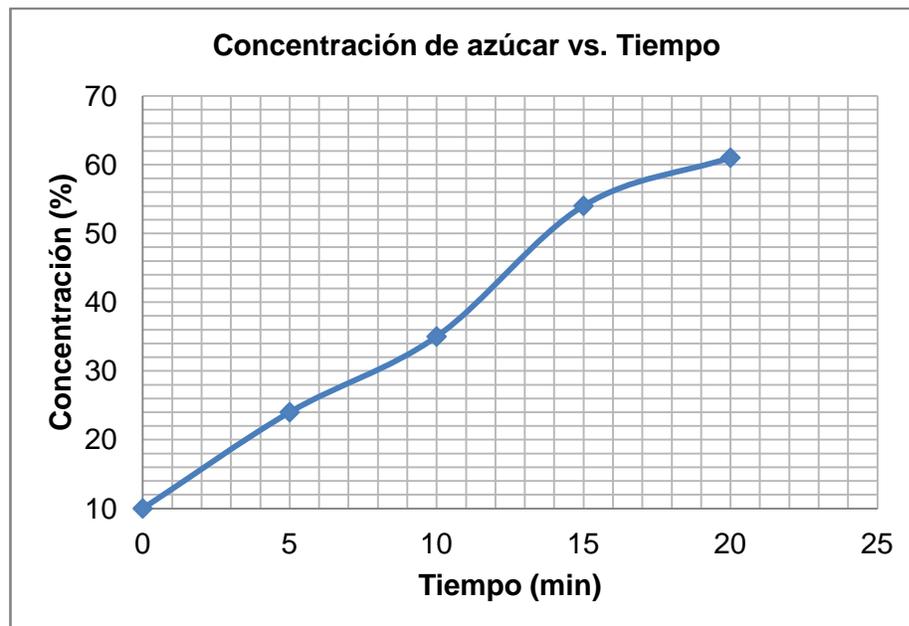


Gráfico 5.8 Concentración vs Tiempo de la prueba No.7 a 18 psig en vacío

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 20 min = 0.33 horas

Presión de vapor= 18 psig (Sistema a Presión negativa)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 18 + 14.7 = 32.7 \text{ psi} \rightarrow T = 124^{\circ}\text{C}; \lambda = 523.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2190.9 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2333.0 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 70^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacío} = 29.9 \text{ inHg} - 22 \text{ inHg} = 7.9 \text{ inHg} = 20 \text{ cmHg}$$

$$L = 4.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 23.0 \frac{\text{kg}}{0.33 \text{ h}} = 69.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 21.0 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{21.0 \text{ kg}}{23.0 \text{ kg}} \times 100 = 91.3\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 69.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 151172 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 70^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 124 - 70 = 54^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{151172}{(1.2)(54)} = 2333 \frac{\text{Kcal}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.61} = 4.1kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 4.1 = 20.9kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El c_p del agua a 26°C y 68°C es de 4.179 y 4.189 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.179(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$c_{p_F} = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.189(1 - (0.55 \times 0.61))$$

$$c_{p_L} = 2.78 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.26(68 - 0)$$

$$h_L = 189.3 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(102.7) + S(2190.9) = (4.1)(189.3) + (20.9)(2333.0)$$

$$S = 21.4 \text{ kg} = 64.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 64.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 140917 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|140917 - 151172|}{140917} \times 100 = 7.3\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{140917}{(1.2)(34)} = 2175 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|2175 - 2333|}{2175} \times 100 = 7.3\%$$

Tabla XX. Resumen de la prueba No.7

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	4.0	4.1	2.4
Vapor V (kg)	21.0	20.9	0.5
Steam S (kg/h)	69.0	64.3	7.3
Calor requerido Q (kJ/h)	151172	140917	7.3
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	2333	2175	7.3
Eficiencia (%)	91.3	97.5	6.3
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.61	0.61	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.8 Prueba No.8 a 18 psig en vacío

Tabla XXI. Datos de la prueba No.8 a 18 psig en vacío (22 inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	18	23.0	-	25.0	0.10	4.0	-	2375	21.0
5			84		0.10		0.24		
10			83		0.10		0.35		
15			87		0.10		0.54		
20			95		0.10		0.62		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

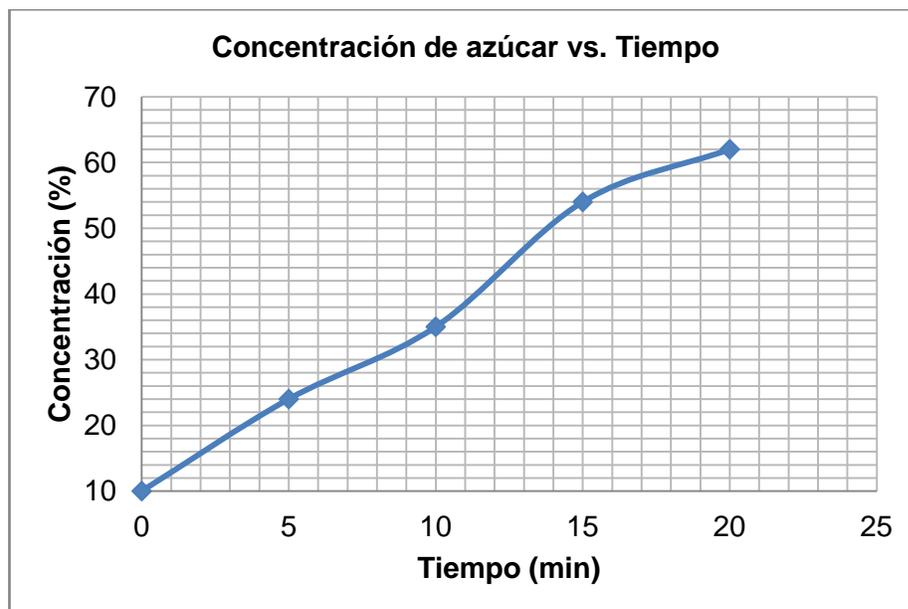


Gráfico 5.9 Concentración vs Tiempo de la prueba No.8 a 18 psig en vacío

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 20 min = 0.33 horas

Presión de vapor= 18 psig (Sistema a Presión negativa)

Concentración inicial= 10%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 18 + 14.7 = 32.7 \text{ psi} \rightarrow T = 124^{\circ}\text{C}; \lambda = 523.4 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2190.9 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2333.0 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 70^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacío} = 29.9 \text{ inHg} - 22 \text{ inHg} = 7.9 \text{ inhg} = 20 \text{ cmHg}$$

$$L = 4.0 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 23.0 \text{ kg} = 69.0 \text{ kg/h}$$

$$V = 21.0 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{21.0 \text{ kg}}{23.0 \text{ kg}} \times 100 = 91.3\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 69.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 151172 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 70^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 124 - 70 = 54^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{151172}{(1.2)(54)} = 2333 \frac{\text{Kcal}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.10)}{0.62} = 4.0 \text{ kg}$$

$$F = L + V \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$V = 25.0 - 4.0 = 21.0 \text{ kg}$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

El c_p del agua a 26°C y 68°C es de 4.179 y 4.189 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.179(1 - (0.55 \times 0.10))$$

$$c_{p_F} = 3.95 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.189(1 - (0.55 \times 0.62))$$

$$c_{p_L} = 2.76 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.95(26 - 0)$$

$$h_F = 102.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.26(68 - 0)$$

$$h_L = 187.7 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(25.0)(102.7) + S(2229.6) = (4.0)(187.7) + (21.0)(2333.0)$$

$$S = \frac{21.5 \text{ kg}}{0.33 \text{ h}} = 64.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 64.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2190.9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 141323 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|141323 - 151172|}{141323} \times 100 = 9.3\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{141323}{(1.2)(34)} = 2181 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|2181 - 2333|}{2181} \times 100 = 7.0\%$$

Tabla XXII. Resumen de la prueba No.8

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	25.0	25.0	-
Producto L (kg)	4.0	4.1	0.8
Vapor V (kg)	21.0	21.0	0.2
Steam S (kg/h)	69.0	64.5	7.0
Calor requerido Q (kJ/h)	151172	141323	9.3
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	2333	2181	9.3
Eficiencia (%)	91.3	97.5	6.4
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.10	0.10	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.62	0.62	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.9 Prueba No.9 a 30 psig atmosférica

Tabla XXIII. Datos de la prueba No.9 atmosférica a 30 psig

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	30	37.0	-	41.0	0.13	8.3	-	2250	32.8
5			95		0.13		0.16		
10			94		0.13		0.19		
15			95		0.13		0.20		
20			96		0.13		0.27		
25			96		0.13		0.34		
30			95		0.13		0.49		
34			98		0.13		0.63		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

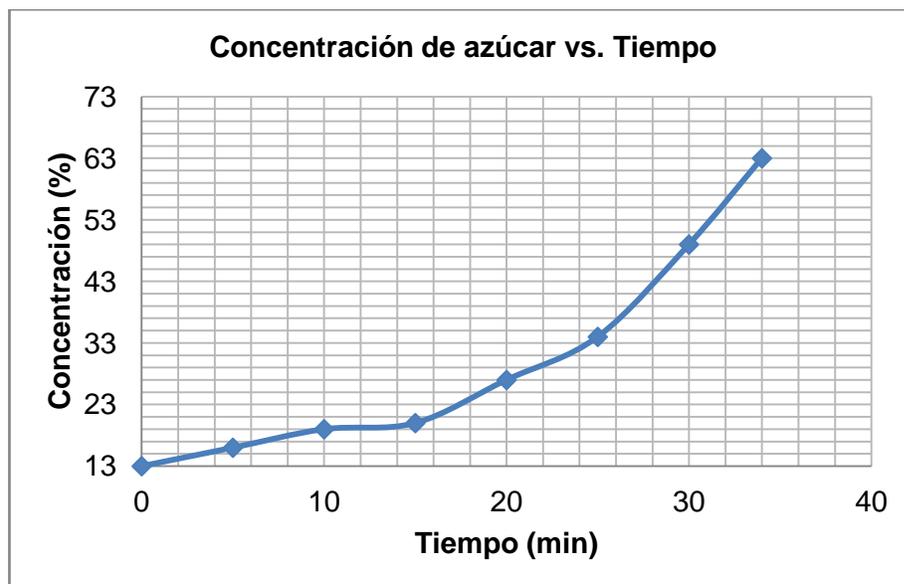


Gráfico 5.10 Concentración vs Tiempo de la prueba No.9 a 30 psig atm

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 34 min = 0.57 horas

Presión de vapor= 30 psig (Sistema a Presión atmosférica)

Concentración inicial= 13%

Tamaño del lote= 41 kg

$$P = 30 + 14.7 = 44.7 \text{ psi} \rightarrow T = 134^{\circ}\text{C}; \lambda = 516 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2156 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados

$$h_v = 2675.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 100^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$L = 8.25 \text{ kg}$$

$$F = 41.0 \text{ kg}$$

$$S = 37.0 \frac{\text{kg}}{0.57\text{h}} = 65.3 \text{ kg/h}$$

$$V = 32.75 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{32.75 \text{ kg}}{37.0 \text{ kg}} \times 100 = 88.5\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 65.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 140774 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE = 0.000693 \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 100^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 134 - 100 = 34^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{140774}{(1.2)(34)} = 3450 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{41.0(0.13)}{0.63} = 8.5kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 41.0 - 8.5 = 32.5kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El c_p del agua a 25°C y 99°C es de 4.180 y 4.214 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.180(1 - (0.55 \times 0.13))$$

$$c_{p_F} = 3.88 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.214(1 - (0.55 \times 0.63))$$

$$c_{p_L} = 2.75 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.88(25 - 0)$$

$$h_F = 97.0 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 2.75(99 - 0)$$

$$h_L = 272.6 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(41.0)(97.07) + S(2156) = (8.5)(272.6) + (32.5)(2675.6)$$

$$S = \frac{39.6 \text{ kg}}{0.57 \text{ h}} = 69.9 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 69.9 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 150691 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|150691 - 140774|}{150691} \times 100 = 6.6\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{150691}{(1.2)(34)} = 3693 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|3693 - 3450|}{3693} \times 100 = 6.6\%$$

Tabla XXIV. Resumen de la prueba No.9

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	41.0	41.0	-
Producto L (kg)	8.3	8.5	2.5
Vapor V (kg)	32.8	32.5	0.6
Steam S (kg/h)	65.3	69.9	6.6
Calor requerido Q (kJ/h)	140774	150691	6.6
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	3450	3693	6.6
Eficiencia (%)	88.5	82.2	7.7
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.13	0.13	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.63	0.63	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.3.10 Prueba No.10 a 30 psig en vacío

Tabla XXV. Datos de la prueba No.10 a 30 psig en vacío (18 inHg - 28inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P _{steam} (psig)	S (kg)	T _s (°C)	F (kg)	X _F	L (kg)	X _L	m _{H2Oref} (kg/h)	V _{cond} (kg)
0	30	35.5	-	41.0	0.13	6.5	-	2500	34.0
5			92		0.13		0.20		
10			89		0.13		0.23		
15			92		0.13		0.27		
20			92		0.13		0.35		
25			92		0.13		0.48		
29			92		0.13		0.76		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

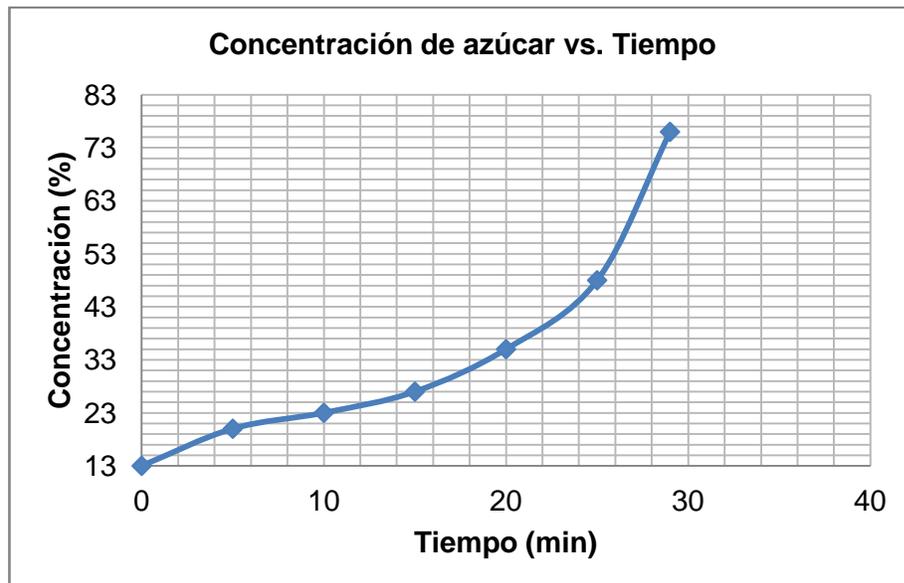


Gráfico 5.11 Concentración vs Tiempo de la prueba No.10 a 30 psig atm

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Cálculos

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 29 min = 0.48 horas

Presión de vapor= 30 psig (Sistema a Presión negativa)

Concentración inicial= 13%

Tamaño del lote= 41 kg

$$P = 30 + 14.7 = 44.7 \text{ psi} \rightarrow T = 134^{\circ}\text{C}; \lambda = 516 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2156 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2333.0 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 70^{\circ}\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacio} = 29.9 \text{ inHg} - 28 \text{ inHg} = 1.9 \text{ inHg} = 4.8 \text{ cmHg}$$

$$L = 6.5 \text{ kg}$$

$$F = 41.0 \text{ kg}$$

$$S = 35.5 \frac{\text{kg}}{0.48 \text{ h}} = 73.4 \text{ kg/h}$$

$$V = 34.0 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{34.0 \text{ kg}}{35.5 \text{ kg}} \times 100 = 95.8\% \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_{\text{Práctico}} = S\lambda = 73.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 158354 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

- Elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE \approx 0^\circ\text{C} \rightarrow t_{eb} = 70^\circ\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 134 - 70 = 64^\circ\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{158354}{(1.2)(64)} = 2062 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (Ec. 5.1)$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{41.0(0.13)}{0.76} = 7.0kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 41.0 - 7.0 = 34.0kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = cp_{agua}(1 - 0.55x_i) \quad (Ec. 2.7)$$

El c_p del agua a 25°C y 68°C es de 4.180 y 4.189 KJ/kg °C respectivamente según la tabla de calor específico del agua entre 0°C y 100°C. [1]

$$c_{p_F} = 4.180(1 - (0.55 \times 0.13))$$

$$c_{p_F} = 3.88 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$c_{p_L} = 4.189(1 - (0.55 \times 0.76))$$

$$c_{p_L} = 2.44 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.88(26 - 0)$$

$$h_F = 97.0 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 2.44(68 - 0)$$

$$h_L = 165.8 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$(41.0)(97.0) + S(2156) = (7.0)(165.8) + (34.0)(2333.0)$$

$$S = \frac{35.5 \text{ kg}}{0.48 \text{ h}} = 73.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{teórico}} = S\lambda = 73.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2156 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 158226 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{\text{teórico}} - Q_{\text{práctico}}|}{Q_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|158226 - 158354|}{158226} \times 100 = 0.1\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{158226}{(1.2)(34)} = 2060 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{\text{teórico}} - U_{\text{práctico}}|}{U_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|2060 - 2062|}{2060} \times 100 = 0.1\%$$

Tabla XXVI. Resumen de la prueba No.10

	Práctico	Teórico	% diferencia
Alimentación F (kg)	41.0	41.0	-
Producto L (kg)	6.5	7.0	7.3
Vapor V (kg)	34.0	34.0	0
Steam S (kg/h)	73.4	73.4	0.1
Calor requerido Q (kJ/h)	158354	158226	0.1
Coeficiente Global U (kJ/h.m².°C)	2062	2060	0.1
Eficiencia (%)	95.8	95.8	0
Concentración inicial x_F (°Brix)	0.13	0.13	-
Concentración final x_L (°Brix)	0.76	0.76	-

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Tabla XXVII. Resultados de los flujos de las pruebas experimentales y teóricas

Prueba	P psig	X _F (%)	X _L (%)	Prácticos					Teóricos				Diferencias (%)			
				F (kg)	L (kg)	V (kg)	S (kg)	Ef (%)	L (kg)	V (kg)	S (kg)	Ef (%)	L	V	S	Ef
Inicial	30	13	66	41.0	7.5	33.25	43.0	77.3	8.1	32.9	39.9	82.4	7.1	1.0	7.7	6.2
1	5	10	30	25.0	8.0	16.5	21.0	78.6	8.3	16.7	20.1	82.9	4.0	1.0	4.4	5.2
2			30	25.0	8.0	16.5	21.0	78.6	8.5	16.5	19.9	82.9	5.6	0.2	5.3	5.2
3			41	25.0	6.0	19.0	21.0	90.5	6.2	18.8	19.2	98.3	2.8	0.9	9.6	8.0
4			41	25.0	6.0	18.5	20.0	92.5	6.1	18.9	19.3	98.1	1.6	2.1	3.8	5.7
5	18		50	25.0	5.0	19.5	23.5	83.0	5.0	20.0	23.9	83.6	0.0	2.5	1.8	0.7
6			50	25.0	5.0	19,5	23.5	83.0	5.1	19.9	23.9	83.6	1.0	2.3	1.5	0.7
7			61	25.0	4.0	21.0	23.0	91.3	4.1	20.9	21.4	97.5	2.4	0.5	7.3	6.3
8			62	25.0	4.0	21.0	23.0	91.3	4.0	21.0	21.5	97.5	0.8	0.2	7.0	6.4
9	30	13	63	41.0	8.3	32.8	37.0	88.5	8.5	32.5	39.6	82.2	2.5	0.6	6.6	7.7
10			76	41.0	6.5	34.0	35.5	95.8	7.0	34.0	35.5	95.8	7.3	0.0	0.1	0.0

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Tabla XXVIII. Resultados de los balances de calor de las pruebas experimentales y teóricos

Prueba	Presión (psig)	T _{eb} (°C)	ΔT (°C)	U práctico (kJ/h m ² °C)	U teórico (kJ/h m ² °C)	Q práctico (kJ/h)	Q teórico (kJ/h)	% Diferencia	
								U	Q
Inicial	30	100	34	2479	2302	101136	93933	7.7	7.7
1	5	100	9	8671	8304	93642	89679	4.4	4.4
2		100	9	8671	8233	93642	88915	5.3	5.3
3		70	39	2001	1825	93642	85406	9.6	9.6
4		70	39	1906	1837	89183	85952	3.8	3.8
5	18	100	24	5363	5460	154458	157231	1.8	1.8
6		100	24	5363	5448	154458	156887	1.5	1.5
7		70	54	2333	2175	151172	140917	7.3	7.3
8		70	54	2333	2181	151172	141323	7.0	9.3
9	30	100	34	3450	3693	140774	150691	6.6	6.6
10		70	64	2062	2060	158354	158226	0.1	0.1

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Gráficas comparativas de los resultados

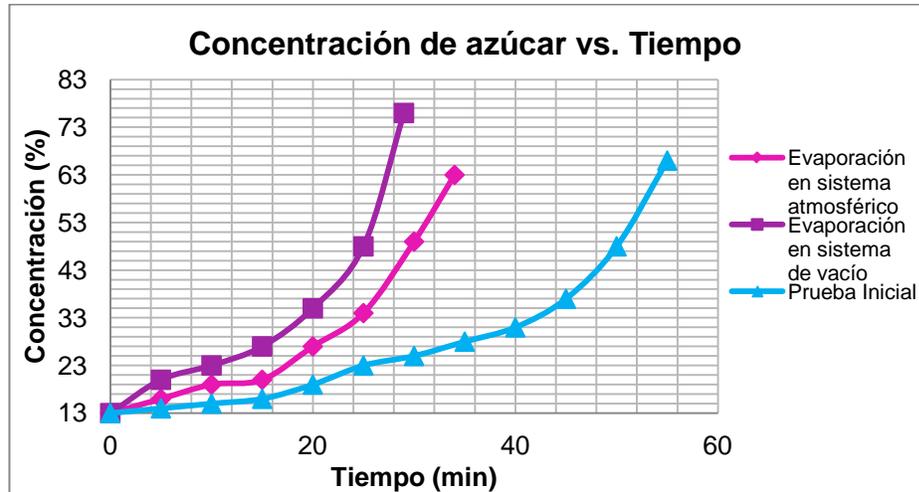


Gráfico 5.12 Comparación de la evaporación antes y después de la reingeniería
Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

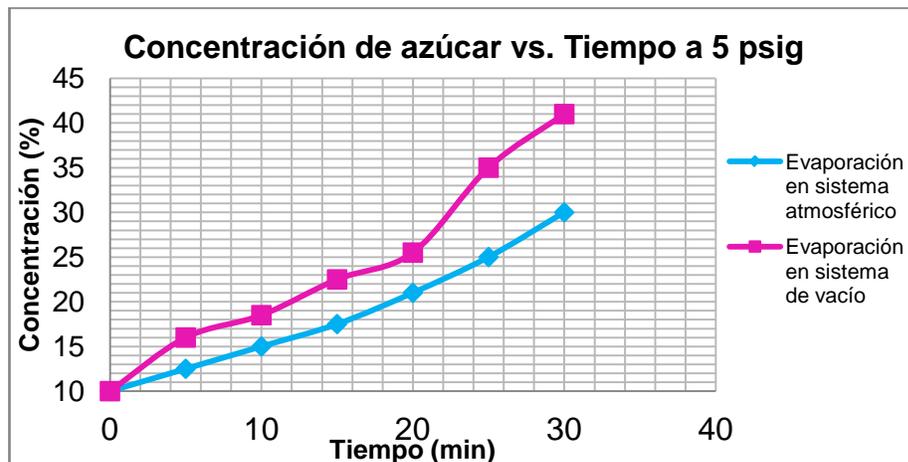


Gráfico 5.13 Gráfica comparativa de la evaporación en sistema atmosférico y de vacío a 5 psig
Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

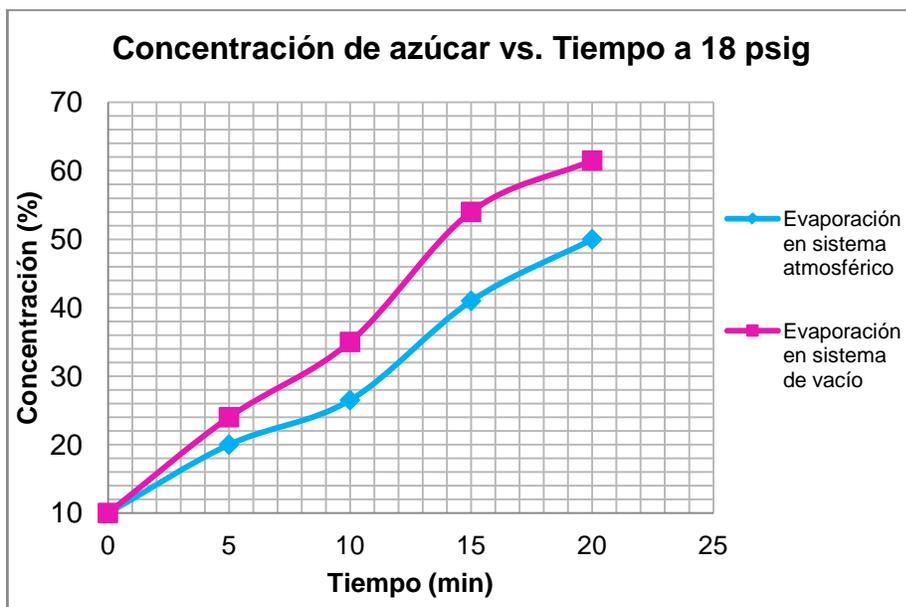


Gráfico 5.14. Gráfica comparativa de la evaporación en sistema atmosférico y de vacío a 18 psig

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

5.4 Prueba adicional con leche entera

Para evaluar si el equipo se encuentra en condiciones de evaporar soluciones distintas al agua azucarada, se realizó también una prueba adicional con leche entera. La prueba fue realizada en el sistema de vacío ya que en la industria alimenticia no se evapora la leche atmosféricamente. Esto se debe a que los nutrientes de la leche se descomponen a elevadas temperaturas, por lo que no se simula un proceso real si se trabaja a presiones atmosféricas.

A continuación, se muestran los datos de la prueba:

Tabla XXIX. Datos de la prueba con leche entera a 24 psig en vacío (28 inHg)

Tiempo (min)	Vapor del caldero			Evaporador				Condensador	
	P_{steam} (psig)	S (kg)	T_s (°C)	F (kg)	X_F	L (kg)	X_L	$m_{\text{H}_2\text{Oref}}$ (kg/h)	V_{cond} (kg)
0	5	21.5	-	25.0	0.07	4.5	-	2500	20.5
5			87		0.07		0.10		
10			82		0.07		0.12		
15			86		0.07		0.17		
20			95		0.07		0.29		
22			95		0.07		0.31		

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

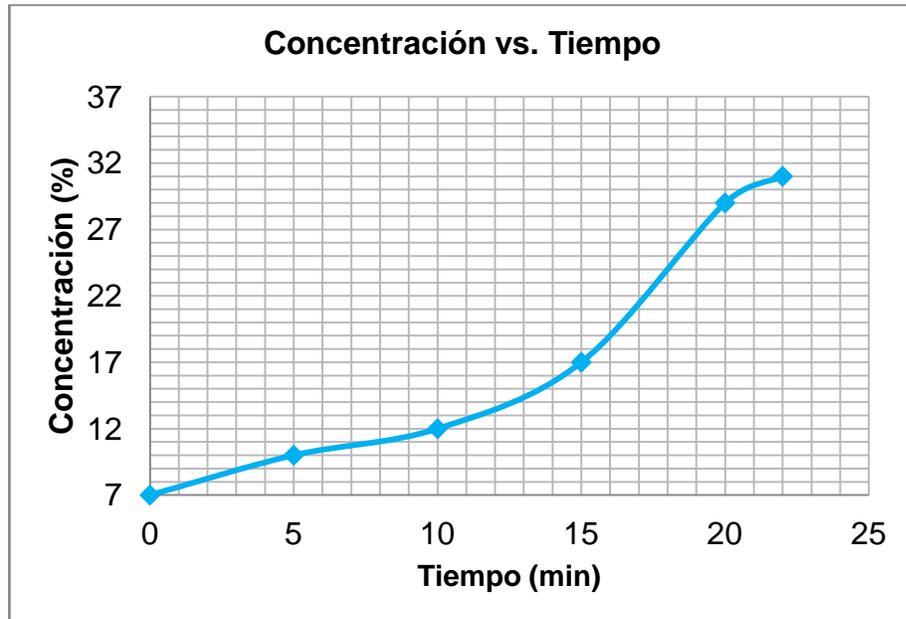


Gráfico 5.15 Concentración vs Tiempo de la evaporación de leche entera
Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

Luego, se procedió a realizar los cálculos respectivos con los datos obtenidos de la prueba experimental.

Datos experimentales:

Tiempo de operación= 22 min = 0.37 horas

Presión de vapor= 22 psig (Sistema a Presión atmosférica)

Concentración inicial= 7%

Tamaño del lote= 25 kg

$$P = 24 + 14.7 = 38.7 \text{ psi} \rightarrow T = 129.5^\circ\text{C}; \lambda = 519.6 \text{ Kcal/kg}$$

$$= 2175.1 \text{ KJ/kg (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

Resultados:

$$h_v = 2320.6 \text{ KJ/kg} \rightarrow T = 75^\circ\text{C (Tabla vapor saturado, Apéndice B)}$$

$$P_{ab} = P_{atm} - P_{vacío} = 29.9 \text{ inHg} - 20 \text{ inHg} = 9.9 \text{ inHg} = 25 \text{ cmHg}$$

$$L = 4.5 \text{ kg}$$

$$F = 25.0 \text{ kg}$$

$$S = 21.5 \text{ kg} = 58.6 \text{ kg/h}$$

$$V = 20.5 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \frac{V}{S} \times 100 = \frac{20.5 \text{ kg}}{21.5 \text{ kg}} \times 100 = 95.3\% \text{ (Ec. 2.12)}$$

$$Q_{Práctico} = S\lambda = 58.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2175.1 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 127540 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \text{ (Ec. 2.2)}$$

- Cálculo de la elevación del punto de ebullición (EPE)

$$EPE = 3.5714C^2 + 1.9643C + 0.0393 \text{ (Ec. 2.10)}$$

Donde C es la concentración de la leche: C= 0.07

$$EPE = 3.5714(0.07)^2 + 1.9643(0.07) + 0.0393$$

$$EPE = 0.2005^{\circ}\text{C} \rightarrow t_{eb} = 76.2^{\circ}\text{C}$$

- Cálculo del Δt_m

$$\Delta t_m = t_s - t_{eb} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$\Delta t_m = 129.5 - 76.2 = 53.3^{\circ}\text{C}$$

- Coeficiente global

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$U = \frac{127540}{(1.2)(53.3)} = 1957 \frac{\text{KJ}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

Análisis teórico:

- Balance de materia:

$$FX_F = LX_L + VY \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde $Y=0$, debido a que es vapor de agua

$$L = \frac{FX_F}{X_L} = \frac{25.0(0.07)}{0.31} = 5.8kg$$

$$F = L + V \quad (Ec. 2.1)$$

$$V = 25.0 - 5.8 = 19.9kg$$

- Cálculos de las entalpías del producto de alimentación y el concentrado

$$h_F = cp_F(T_F - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.5)$$

$$h_L = cp_L(T_1 - T_{Ref}) \quad (Ec. 2.6)$$

Por lo cual es necesario conocer los calores específicos dependiendo de las concentraciones de las sustancias, a esto nos lleva la ecuación:

$$cp_i = 4.184(2.686C) \quad (Ec. 2.8)$$

Donde: Cp_i : Calor específico de la leche (KJ/kg °C)

C: Concentración de la leche

$$cp_F = 4.184(2.686(0.07))$$

$$cp_F = 3.99 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$cp_L = 4.184(2.686(0.31))$$

$$cp_L = 3.35 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para las entalpías se tomará como temperatura referencia 0°C:

$$h_F = 3.99(25 - 0)$$

$$h_F = 99.7 \frac{KJ}{kg}$$

$$h_L = 3.26(73 - 0)$$

$$h_L = 244.6 \frac{KJ}{kg}$$

- Balance de calor

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + Vh_V \quad (Ec. 2.4)$$

$$(25.0)(99.7) + S(2175.1) = (5.8)(244.6) + (19.2)(2320.6)$$

$$S = 19.9kg = 54.4 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{teórico} = S\lambda = 54.4 \frac{kg}{h} \times 2175.1 \frac{KJ}{kg} = 118320 \frac{KJ}{h} \quad (Ec. 2.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|Q_{teórico} - Q_{práctico}|}{Q_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|118320 - 127540|}{118320} \times 100 = 7.8\%$$

- Coeficiente Global teórico

$$U = \frac{Q}{A_o \Delta t_m} \quad (Ec. 2.3)$$

$$U = \frac{118320}{(1.2)(34)} = 1816 \frac{KJ}{h \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|U_{teórico} - U_{práctico}|}{U_{teórico}} \times 100 \quad (Ec. 5.2)$$

$$\% \text{ diferencia} = \frac{|1816 - 1957|}{1816} \times 100 = 7.8\%$$

Tabla XXX. Resultados de la prueba de evaporación de leche entera

Tiempo (min)		22
Presión (psig)		24
X_F		0.07
X_L		0.31
F_{experimental} (kg)		25.0
L_{experimental} (kg)		4.5
V_{experimental} (kg)		20.5
S_{experimental} (kg)		21.5
L_{teórico} (kg)		5.8
V_{teórico} (kg)		19.2
S_{teórico} (kg)		19.9
Eficiencia (%)		95.3
T_{eb} (°C)		75
ΔT (°C)		54
EPE		0.20
U práctico (kJ/h m²°C)		1957
U teórico (kJ/h m²°C)		1816
Q práctico (kJ/h)		127540
Q teórico (kJ/h)		118320
% Diferencia	L	5.8
	V	7.0
	S	7.8
	Q	7.8
	U	7.8

Fuente: Balseca, I. & Flores, K., 2016

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y

CONCLUSIONES

6.1 Análisis de resultados

Al comparar los resultados obtenidos de la prueba realizada previa a las modificaciones del equipo, junto con los de las pruebas hechas luego de la reingeniería a una presión de operación de 30 psig, se pueden notar mejorías en el evaporador. Las tres pruebas fueron realizadas con la misma concentración inicial de 13% y masa inicial de 41 kg. Primero, la eficiencia del equipo aumentó de 77% a 88% en sistema atmosférico. Al trabajar a una presión negativa (vacío), se observó que la eficiencia incrementó hasta 96%. En el equipo original se concentró una solución hasta 66% en 55 minutos.

Luego de los cambios, se redujo el tiempo de concentración, logrando obtener una solución de 63% en un tiempo de 34 minutos a presión atmosférica. Al trabajar en vacío, con la misma concentración inicial se obtuvo una solución concentrada de 76% en sólo 29 minutos.

De esta manera, se puede verificar la optimización del equipo al aumentar su eficiencia y lograr obtener soluciones con mayor concentración en un menor tiempo, tanto en sistema atmosférico como en vacío. Al comparar los coeficientes de transferencia de calor de los sistemas atmosféricos a 30 psig, se evidenció el aumento del valor de este coeficiente, lo que significa que se consiguió una mayor transferencia de calor.

Durante las pruebas experimentales, se trabajaron soluciones a diferentes presiones en sistema atmosférico y de vacío, manteniendo constante la concentración inicial de 10% y la masa inicial de 25 kg, para poder determinar la presión ideal para el proceso. Se realizaron pruebas por duplicado para cada una de las presiones, en las cuales los resultados obtenidos fueron similares entre sí. Esto quiere decir que las experimentaciones fueron hechas de manera correcta.

A 5 psig se concentró la solución azucarada a 30% en 30 minutos, con una eficiencia de 78%. Cuando se realizó la prueba en sistema de vacío, se concentró la misma solución inicial llegando hasta una concentración de 41% en el mismo período de tiempo con una eficiencia de 91%. Se demuestra así que, al trabajar con presiones negativas, la eficiencia del equipo aumenta drásticamente.

Este comportamiento se pudo verificar realizando pruebas a otras presiones de operación. A 18 psig se logró obtener una solución azucarada a 50% de concentración, partiendo también desde 10% atmosféricamente, con una eficiencia de 83% en 20 minutos. En cambio, manteniendo los parámetros iniciales y el mismo tiempo, las pruebas realizadas en vacío concentraron la solución hasta 61% con una eficiencia de 91%.

Se puede notar que el coeficiente global de transferencia de calor de las pruebas realizadas en vacío es menor a las obtenidas en la experimentación a presión atmosférica. Esto se debe a que se suministra una menor cantidad de calor a la evaporación en vacío, ya que el punto de ebullición de la mezcla disminuye. Por ende, la diferencia entre la temperatura de ebullición y de saturación del vapor es mayor y provoca que el valor del coeficiente disminuya.

Comparando los resultados obtenidos de las pruebas a presiones de 5 psig y 18 psig, se observó que, si se trabaja a una presión mayor, se obtiene una solución de mayor concentración en un menor tiempo. Cuando el vapor de agua ingresa a la calandria con una menor presión, se necesita más calor para evaporar la solución. Por esto, las pruebas a presiones mayores fueron más rápidas al lograr llegar a la temperatura de ebullición en un menor tiempo, con la misma alimentación inicial.

Adicionalmente, se realizó una prueba con 25 kg de leche entera en sistema de vacío para obtener leche evaporada. Se trabajó a una presión de 24 psig y una concentración inicial de 7%, logrando concentrar la leche hasta 31% en 22 minutos. Se eliminó aproximadamente el 86% de agua de la leche.

6.2 Conclusiones

1. Se aumentó la eficiencia del evaporador de tubos verticales cortos de simple efecto mediante su reingeniería. Se lograron obtener soluciones azucaradas con una mayor concentración en un menor tiempo de operación.
2. Al trabajar con presiones de vacío, se obtienen concentraciones más elevadas en comparación a un sistema atmosférico, además de aumentar la eficiencia del proceso.
3. La temperatura de ebullición de la solución disminuye cuando se trabaja en sistemas de vacío, requiriendo una menor cantidad de calor para la ebullición de la sustancia. Cuando se requiere evaporar soluciones que sensibles al calor, se debe trabajar con presiones negativas para evitar su descomposición.
4. Cuando ingresa el vapor calefactor a la calandria con menor presión, se requiere una mayor cantidad de calor para que la solución líquida pueda alcanzar su temperatura de ebullición. Por esto, el λ incrementa. En cambio, cuando se trabaja a presiones mayores del vapor calefactor, es más fácil que el líquido entre a ebullición, por lo que tomará menos tiempo concentrar una solución.

5. Un parámetro que se debe controlar durante la operación es la presión de vapor que ingresa a la calandria. Esto se debe a que, a mayor presión, se alcanza una mayor concentración en el producto en un menor tiempo.
6. Los deflectores evitan el arrastre de partículas de líquido hacia el condensador, mejorando la calidad del vapor generado y ayudando a incrementar la eficiencia del evaporador.
7. La recirculación adaptada al equipo ayuda a homogenizar la solución, dando resultados más precisos al realizar la toma de muestras durante el proceso de evaporación ya que evita que el líquido se quede estancado.
8. El evaporador instalado en el laboratorio es pequeño al ser un equipo piloto, lo que causa que la elevación del punto de ebullición sea despreciable.
9. Debido a que el equipo es un evaporador vertical de tubos cortos, y a pesar de tener deflectores, no funciona de manera correcta para sistemas con líquidos viscosos. Al evaporar leche entera, se tuvo problemas ya que subió el nivel de la espuma provocada mediante la ebullición de la sustancia, llegando hasta la salida de vapor del equipo. Esto provocó pérdidas, ya que parte de la solución salió con el líquido condensado.

10. Cuando se trabaja con soluciones sensibles al calor, un parámetro de control importante en el proceso de evaporación es la temperatura dentro del equipo. De ser necesario modificar la temperatura, se debe regular el flujo y la presión del vapor que ingresa a la calandria.
11. El funcionamiento del equipo refleja un consumo de combustible bajo de \$0.86/h. Mientras que, el consumo eléctrico es relativamente despreciable puesto que la energía que utiliza las bombas tanto de alimentación, recirculación y vacío son 0.34 kw, 0.75 kw y 0.33 kw respectivamente y el foco LED de 8w.

6.3 Recomendaciones

- Realizar purgas del tanque de protección de la bomba vacío, para evitar el deterioro de la misma.
- No permitir que la solución azucarada llegue a una concentración mayor a 70%, ya que se dificulta la evacuación del producto y la limpieza del equipo posterior a la práctica.
- Utilizar la bomba de recirculación por un tiempo máximo de 1 minuto para impedir que su vida útil disminuya.

- Cerrar las válvulas de recirculación mientras se opere el equipo, para que el vapor generado no afecte a la bomba. Sólo se las debe abrir al momento de recircular la solución.
- Evitar que el nivel de la solución baje menos de la mitad de la calandria para no permitir que se exponga directamente al vapor generado del caldero, pudiendo dañar el banco de tubos.
- Llenar el equipo hasta máximo la mitad de la mirilla para poder tener una mejor visión dentro del equipo.
- Para la evaporación de sustancias viscosas como la leche, se recomienda añadir al equipo un cortaespumas. De esta manera, se evita la elevación del nivel de espuma provocada por su ebullición.
- Al finalizar cada práctica, se debe realizar una corrida del equipo con agua para su limpieza.
- Utilizar guantes cuando se tome la muestra tanto trabajando en atmosférico como en vacío, para evitar quemaduras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Basantes, F., Montesdeoca, N., & Santos, M. (2014). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un Evaporador de simple Efecto de Tubos Verticales Cortos*. Guayaquil.
- [2] Cárdenas, J., Chong-Qui, E., & Valdivieso, M. (1984). *Diseño, Construcción y Montaje de una Unidad de Evaporación de Doble Efecto con fines didácticos*. Ecuador.
- [3] Carlos, S. (s.f.). *Proceso de producción*. Obtenido de San Carlos: http://www.sancarlos.com.ec/portal/html/themes/ingenio/pdf/proceso_produccion.pdf
- [4] Casas, O., Sabaté, E., Casas, F., & López, J. (30 de Octubre de 2008). La evaporación al vacío, una tecnología para la reducción de residuos y reutilización del agua. *Tecnología del Agua* .
- [5] Cengel. (3 de Enero de 2007). *Transferencia de Masa*. Obtenido de McGraw Hill Education: file:///C:/Users/Anabel/Downloads/cengel_transferencia_3e_capitulo_muestra_c14.pdf

- [6] Cengel, Y., & Boles, M. (2011). *Thermodynamics An Engineering Approach*. Ed. McGraw Hill. Séptima Edición.
- [7] Condorchem Envitech. (s.f.). *Evaporación al vacío para el tratamiento de aguas residuales industriales*. Obtenido de Evaporadores al Vacío: <http://www.evaporadoresalvacio.com/>
- [8] Condorchem Envitech. (9 de Diciembre de 2014). *Fundamentos de la Evaporación al Vacío*. Obtenido de Condorchem Envitech: <http://blog.condorchem.com/fundamentos-evaporacion-al-vacio/>
- [9] Controlgraf S.L. (s.f.). *Evaporación al vacío*. Obtenido de Controlgraf: <http://www.controlgraf.com>
- [10] Coronel, J. (s.f.). *Evaporadores*. Obtenido de Campusvirtual: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/Apuntes/EVAPORADORES%20,%20CONDESADORES%20Y%20TUBERIAS.pdf>
- [11] Corporation, M. E. *Patente nº Super Line*. Japón.
- [12] Cuba Educa. (2015). *Fundamentos de la Transferencia de Masa*. Obtenido de Cuba Educa: <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2697.pdf>
- [13] Darhor Technology. *Manual de Especificaciones*.

- [14] Díaz, C., Galván, E., Ramos, E., & Castillo, F. (2013). *Metodología para el Diseño Óptimo de evaporadores de Películas Descendente*. México.
- [15] Erdogdu, F. (2009). *Optimization in Food Engineering*. Nueva York: CRC PRES Taylor & Francis Group.
- [16] Escobar, S., & Santillán, O. (2011). *Diseño y Construcción de un Evaporador de Simple Efecto con Serpentín Horizontal para la Obtención de Arequipe*. Riobamba.
- [17] Espinoza, M. (2014). *Operaciones y procesos unitarios* . Chiclayo-Perú: Escuela de Ingeniería Industrial.
- [18] Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L., & Andersen, L. (2006). *Principios de Operaciones Unitarias*. México: CECOSA.
- [19] Franco, C., & Ojeda, E. (25 de Abril de 2008). *Evaporación en efecto simple y múltiple*. Obtenido de Open Course Ware de la Universidad de Sevilla: OpenCourseWare de la Universidad de Sevilla: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_05.htm
- [20] Franco, J. A. (2007). *Diseño de un Simulador por Computadora de Procesos de Evaporación*. Revista Electrónica Ingeniería Primero.

- [21] Geankoplis, C. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México: CECSA.
- [22] *Google Maps*. (s.f.). Recuperado el 23 de Agosto de 2016, de [https://www.google.com.ec/maps/place/Escuela+Superior+Polit%C3%A9cnica+d+el+Litoral+\(ESPOL\)/@-2.1458734,-79.9672538,875m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x902d72f925e5bfdb:0x327cdb9f7f4ba3b2!8m2!3d-2.1481458!4d-79.9644885](https://www.google.com.ec/maps/place/Escuela+Superior+Polit%C3%A9cnica+d+el+Litoral+(ESPOL)/@-2.1458734,-79.9672538,875m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x902d72f925e5bfdb:0x327cdb9f7f4ba3b2!8m2!3d-2.1481458!4d-79.9644885)
- [23] Grupo Cecatherm. (2010). *Radiación, Convección, Conducción*. Obtenido de Cecatherm: <http://www.cecatherm.com/calefaccion-radiante/radiacion-conveccion-conduccion>
- [24] Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- [25] Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. (2015). *Seguridad Industrial*. Obtenido de Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud: <http://www.istas.net/web/index.asp?idpagina=1286>
- [26] Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Continental.
- [27] Marcano, R. (Junio de 2013). *Evaporadores*. Obtenido de Wordpress: <https://marcanord.files.wordpress.com/2013/06/tema-2-evaporadores.pdf>

- [28] Martínez. (2012). *Diseño Tanques de Almacenamiento*. Obtenido de Universidad de Granada: http://www.ugr.es/~aulavirtualpfciq/descargas/documentos/Disenio_Tanques_Almacenamiento.pdf
- [29] McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw Hill.
- [30] Morales, C. (2012). *Diseño experimental para la operación de un Sistema de Evaporación Doble Efecto ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias USAC*. Guatemala.
- [31] Morales, E. *Unidad: Evaporación*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- [32] Perry, R. H., & Green, D. W. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid: McGraw Hill.
- [33] QIANG, L. (s.f.). *Evaporador concentrador de simple efecto*. Obtenido de LONG QIANG: <http://www.foodmachinery.es/4a-circulating-concentrator.html>
- [34] Relaciones Laborales. (2011). *Seguridad Industrial*. Obtenido de Relaciones Laborales: http://148.204.211.134/polilibros/Portal/Polilibros/Complemento%20Material%20Didactico/RELACIONES_LABORALES/EL%20GUARRO%20MACUARRO/subprograma%20especifico%20de%20equipos%20de%20proteccion.htm

- [35] Requena, G., Rodríguez, M., & Mauricio, F. (2006). *Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- [36] Sapiña, F. (28 de Julio de 2012). ¿Por qué cuando la leche hierve se derrama y el agua no? *ABC.es* , págs. <http://www.abc.es/20120728/ciencia/abci-cuando-leche-hierve-derrama-201207261430.html>.
- [37] SIEMENS. (2015). *Motores monofásicos*. Obtenido de Siemens Bombas: <http://orbelect.com/wp-content/uploads/2015/03/monofasicos-semiabierto-tefc-serie-1lf.pdf>
- [38] Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. (s.f.). *Unidad 3: Evaporación y Evotranspiración*. Obtenido de UNICEN: <http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad3.pdf>
- [39] Vaxa Software. (s.f.). *Calor Específico del Agua*. Obtenido de Vaxa Software: www.vaxasoftware.com
- [40] Velázquez, M. *Manual de prácticas y guías pedagógicas para la unidad de evaporación de efecto simple y de doble efecto instalada en el salón Q1115 de la Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira: Unidad Tecnológica de Pereira.

[41] Viejo, M., & Álvarez, J. (2004). Aplicaciones de la bomba. En *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones* (pág. 194). México: LIMUSA S.A.

[42] Vodopived, A. (2001). *Diseño integral a Escala Piloto, de una Unidad didáctica de Evaporador de Doble Efecto de Tubos Verticales Cortos, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales*. Guayaquil.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Apéndice A1. Diagrama de flujo del evaporador

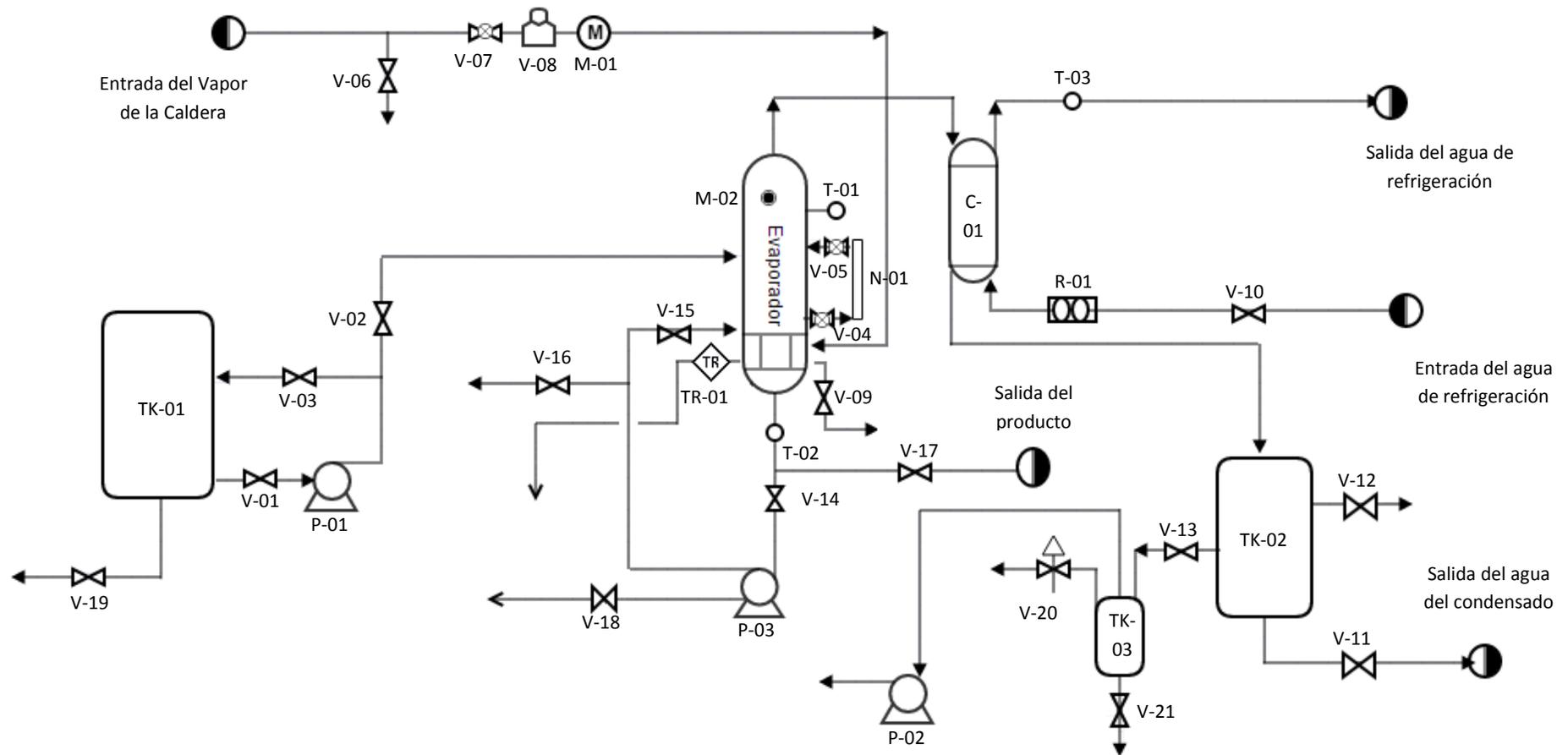


Figura. 4.1 Diagrama de Flujo del Evaporador de Simple Efecto
Fuente: Balseca I., Flores K., 2016

Simbología:

 Válvula de esfera

 Termómetro

 Bomba de recirculación

 Flujo de salida

 Válvula de globo

 Vacuómetro

 Bomba de Vacío

 Nivel

 Válvula de purga

 Manómetro

 Regulador de Presión

 Bomba de alimentación

 Flujo de entrada

Medidor de flujo

APÉNDICE B

Apéndice B1. Tabla de Vapor del Agua: Tabla de Temperaturas

914 PROPERTY TABLES AND CHARTS												
TABLE A-4 Saturated water—Temperature table												
Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2566
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8319	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50950	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5336	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Fuente: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2011). Thermodynamics An Engineering Approach. Ed. Mc Graw Hill. Séptima Edición.

Tabla de Vapor del Agua: Tabla de Temperaturas

918
APPENDIX I

TABLE A-4
Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1766.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1496.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7460
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7089
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6687
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18666	0.001885	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19822	0.002015	0.006009	1772.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Source: Tables A-4 through A-8 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the highly accurate Steam_IAPWS, which incorporates the 1995 Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, issued by The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). This formulation replaces the 1984 formulation of Haar, Gallagher, and Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), which is also available in EES as the routine STEAM. The new formulation is based on the correlations of Saal and Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) with modifications to adjust to the International Temperature Scale of 1990. The modifications are described by Wagner and Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). The properties of ice are based on Hyland and Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K," ASHRAE Trans., Part 2A, Paper 2793, 1983.

Fuente: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2011). Thermodynamics An Engineering Approach. Ed. Mc Graw Hill. Séptima Edición.

Apéndice B2. Tabla de Vapor del Agua: Tabla de Presión

916
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6965	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.6268	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Fuente: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2011). Thermodynamics An Engineering Approach. Ed. Mc Graw Hill. Séptima Edición.

Tabla de Vapor del Agua: Tabla de Presión

917 APPENDIX 1												
TABLE A-5												
Saturated water—Pressure table (Concluded)												
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1806.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2011). Thermodynamics An Engineering Approach. Ed. Mc Graw Hill. Séptima Edición.

Apéndice B3. Factor de Conversión

Conversion Factors

DIMENSION	METRIC	METRIC/ENGLISH
Acceleration	1 m/s ² = 100 cm/s ²	1 m/s ² = 3.2808 ft/s ² 1 ft/s ² = 0.3048* m/s ²
Area	1 m ² = 10 ⁴ cm ² = 10 ⁶ mm ² = 10 ⁻⁶ km ²	1 m ² = 1550 in ² = 10.764 ft ² 1 ft ² = 144 in ² = 0.09290304* m ²
Density	1 g/cm ³ = 1 kg/L = 1000 kg/m ³	1 g/cm ³ = 62.428 lbm/ft ³ = 0.036127 lbm/in ³ 1 lbm/in ³ = 1728 lbm/ft ³ 1 kg/m ³ = 0.062428 lbm/ft ³
Energy, heat, work, internal energy, enthalpy	1 kJ = 1000 J = 1000 N · m = 1 kPa · m ³ 1 kJ/kg = 1000 m ² /s ² 1 kWh = 3600 kJ 1 cal [†] = 4.184 J 1 IT cal [†] = 4.1868 J 1 Cal [†] = 4.1868 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia · ft ³ = 778.169 lbf · ft 1 Btu/lbm = 25.037 ft ² /s ² = 2.326* kJ/kg 1 kJ/kg = 0.430 Btu/lbm 1 kWh = 3412.14 Btu 1 therm = 10 ⁵ Btu = 1.055 × 10 ⁴ kJ (natural gas)
Force	1 N = 1 kg · m/s ² = 10 ⁵ dyne 1 kgf = 9.80665 N	1 N = 0.22481 lbf 1 lbf = 32.174 lbm · ft/s ² = 4.44822 N
Heat flux	1 W/cm ² = 10 ⁴ W/m ²	1 W/m ² = 0.3171 Btu/h · ft ²
Heat transfer coefficient	1 W/m ² · °C = 1 W/m ² · K	1 W/m ² · °C = 0.17612 Btu/h · ft ² · °F
Length	1 m = 100 cm = 1000 mm = 10 ⁶ μm 1 km = 1000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048* m 1 mile = 5280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54* cm
Mass	1 kg = 1000 g 1 metric ton = 1000 kg	1 kg = 2.2046226 lbm 1 lbm = 0.45359237* kg 1 ounce = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbm = 14.5939 kg 1 short ton = 2000 lbm = 907.1847 kg
Power, heat transfer rate	1 W = 1 J/s 1 kW = 1000 W = 1.341 hp 1 hp [†] = 745.7 W	1 kW = 3412.14 Btu/h = 737.56 lbf · ft/s 1 hp = 550 lbf · ft/s = 0.7068 Btu/s = 42.41 Btu/min = 2544.5 Btu/h = 0.74570 kW 1 boiler hp = 33,475 Btu/h 1 Btu/h = 1.055056 kJ/h 1 ton of refrigeration = 200 Btu/min
Pressure	1 Pa = 1 N/m ² 1 kPa = 10 ³ Pa = 10 ⁻³ MPa 1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bars = 760 mm Hg at 0°C = 1.03323 kgf/cm ² 1 mm Hg = 0.1333 kPa	1 Pa = 1.4504 × 10 ⁻⁴ psia = 0.020886 lbf/ft ² 1 psi = 144 lbf/ft ² = 6.894757 kPa 1 atm = 14.696 psia = 29.92 in Hg at 30°F 1 in Hg = 3.387 kPa
Specific heat	1 kJ/kg · °C = 1 kJ/kg · K = 1 J/g · °C	1 Btu/lbm · °F = 4.1868 kJ/kg · °C 1 Btu/lbmol · R = 4.1868 kJ/kmol · K 1 kJ/kg · °C = 0.23885 Btu/lbm · °F = 0.23885 Btu/lbm · R

*Exact conversion factor between metric and English units.

†Calorie is originally defined as the amount of heat needed to raise the temperature of 1 g of water by 1°C, but it varies with temperature. The international steam table (IT) calorie (generally preferred by engineers) is exactly 4.1868 J by definition and corresponds to the specific heat of water at 15°C. The thermochemical calorie (generally preferred by physicists) is exactly 4.184 J by definition and corresponds to the specific heat of water at room temperature. The difference between the two is about 0.06 percent, which is negligible. The capitalized Calorie used by nutritionists is actually a kilocalorie (1000 IT

Fuente: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2011). Thermodynamics An Engineering Approach. Ed. Mc Graw Hill. Séptima Edición.

Apéndice B4. Calor Específico del Agua (Cp)

Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C

Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico	
	$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						

Fuente: www.vaxasoft.com

APÉNDICE C

Apéndice C1. Especificaciones de la bomba de Recirculación



Ejecución NEMA 56J

Este motor está diseñado con un alto par de arranque y baja corriente de arranque. La principal aplicación del motor con este tipo de brida se encuentra en las bombas centrífugas y otros equipos

que requieran acople directo, ya sea en posición horizontal o vertical, tales como cortacésped o vibradores. Su característica par-velocidad, factor de

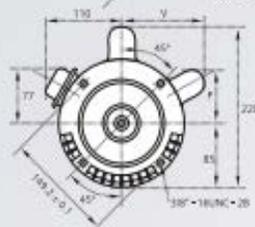
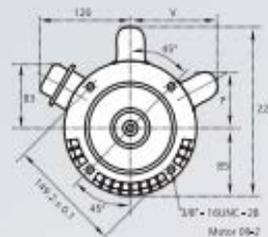
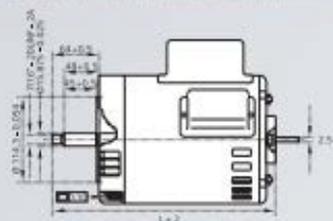
servicio, sentido de giro, dimensiones, etc., corresponden a los estándares normalizados por NEMA.

Otras ejecuciones son fabricadas bajo pedido.

Tipo	Frame IEC	Potencia [HP]	Factor de Servicio	Voltaje [V]	Corriente Nominal [A]	Eficiencia (%)	Factor de Potencia Cos φ	Velocidad Nominal (rpm)	Torque Nominal [Nm]	Torque Arranque [Nm]	Corriente de Arranque [In/A]	Peso Neto [kg]	Condensador de Arranque [µF]	Condensador de Marcha [µF]
1F3 093-21809	90	0,3	1,75	115/230	6,3/3,15	47,6	0,72	3450	0,7	1,4	4,7	8,8	216-259	
1F3 093-21809	90	0,5	1,4	115/230	7,8/3,9	61,1	0,68	3450	1,0	1,7	4,7	9,6	216-259	
1F3 094-21809	90	0,8	1,5	115/230	10,0/5,0	69,5	0,78	3450	1,5	2,8	5,4	10,9	216-259	
1F3 095-21809	90	1,0	1,4	115/230	13,0/6,5	66,5	0,75	3520	2,01	4,2	5,1	12,5	340-408	
1F3 096-21809	90	1,5	1,30	115/230	17,5/8,75	66,5	0,78	3515	3,06	6,12	5,4	15,0	340-408 +	20
1F3 097-21809	90	2,0	1,30	115/230	23,0/11,0	67,5	0,88	3450	4,0	8,1	5,0	15,6	540-648*	40
1F3 098-21809	90	3,0	1,15	115/230	30,0/15,0	76,3	0,85	3500	6,11	10,2	4,8	17,9	540-648 +	40

- 1) En este motor se adiciona un condensador de marcha de 20µF.
- 2) En este motor se adiciona un condensador de marcha de 40µF.

Dimensiones generales (en milímetros)					
Tipo 18F3	Potencia HP	L	p	v	Peso (Kg)
093-2	1/3	271	66	116	8,8
093-2	1/2	271	66	116	9,6
094-2	3/4	296	66	116	10,9
095-2	1,0	297	73	125	12,5
096-2	1,5	317	73	125	15,0
097-2	2,0	325	67	118	15,6
098-2	3,0	350	73	125	17,9



Fuente: SIEMENS. (2015). *Motores monofásicos*. Obtenido de Siemens Bombas: <http://orbelect.com/wp-content/uploads/2015/03/monofasicos-semiabiertoestefc-serie-1lf.pdf>

Apéndice C2. Especificaciones del Rotámetro



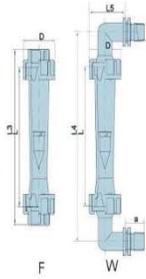
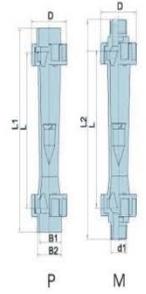
DF4500 Series Polysulfone/Polycarbonate Tube Flowmeters

DF-4500 Series inline flow meter

- ✔ Designed to be
- ✔ Easy to install.
- ✔ Chemically resistant molded polysulfone
- ✔ Water ranges from 0.1 LPM to 250 GPM
- ✔ Capable of withstanding higher temperatures
- ✔ Economical and durable

Meter Body: Polysulfone (PSU) or UPVC
Float: 316SS, PVDF, or Teflon (based on model)
Guide rod: SS316 Stainless (opt. PTFE liner)
Adapters: Polysulfone
O-Rings: Viton

Scale: Permanent, dual scale silkscreen
Max. PSig: 175 PSIG / 12 BAR at 70° F / 21° C
Max. Temp: 212° F / 100° C at 0 pressure
Accuracy: ± 4% of full scale reading



Model	Range		metric union	Installation			% accuracy	working pressure
	(LPM)	(GPM)		male thread connection	female thread connection	elbow connection		
DF-4500	0.5-4	0.1-1	20	1/2" NPT			5	0.6MPa
	1.8-18	0.5-5				1/2" NPT		
DF-4500C	0.5-4	0.1-1	20	1/2" NPT			5	0.6MPa
	1.8-18	0.5-5				1/2" NPT		
DF-45015	1-10	0.25-2.5	20	1/2 or 3/4" NPT			5	0.6MPa
	1.8-18	0.5-5				1/2" NPT		
DF-45025	3-30	0.8-8	32	3/4" NPT	3/4" G		5	0.6MPa
	4-40	1-10						
DF-45032	5-50	1.2-12	40	1" NPT	1" G		5	0.6MPa
	8-80	2-20						
DF-45050	10-100	2.5-25	63	2" NPT	2" G		5	0.6MPa
	10-100	2.5-25						
DF-45065	20-180	5-45	75	2 1/2" NPT	2 1/2" G		5	0.6MPa
	25-250	7-70						
DF-45085	80-400	25-110	100	3" NPT	3" G		5	0.6MPa
	150-650	40-160						
DF-450125	200-1000	50-250	150	4" NPT	4" G		5	0.6MPa

Model	Body material	Metric Union (P)	Male Thread	Female Thread	Elbow (W)	Float materia
DF-45008	PC, PSU	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	316
DF-4500C	PC, PSU	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	316
DF-45015	PC, PSU	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	316
DF-45025	PC	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	ABS, 316
DF-45032	PC	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	ABS, 316
DF-45050	PC, PSU	PVC	Pa ₁	Pa ₁	PVC	ABS, 316
DF-45065	AS	ABS	Pa ₁	Pa ₁	PVC	ABS
DF-450100	AS	ABS	Pa ₁	Pa ₁	Pa ₁	ABS
DF-450125	AS	ABS				ABS

Model	L	D	Metric Union (P)			Male Thread (M)			Female Thread (M)			Weight (kg)				Elbow (W)
			L1	B2	B1	L2	L3	L4	E	B	f	L	E	B	f	
DF-45008	100	42	150	20	26	170			153	27	55	Φ13				0.15
DF-4500C	160	50	208	20	26	225			252	27	55	Φ13				0.2
DF-45015	134	50	180	20	26	210			205	27	55	Φ13				0.2
DF-45025	170	59	230	32	39	250		225	270	25	83	Φ20				0.4
DF-45032	225	72	290	40	49	312		290	325	31	95	Φ25				0.65
DF-45050	290	100	375	63	73	400		370	440	40	120	Φ45				2.5
DF-45065	325	120	420	75	89			423								3.5



Fuente: Darhor Technology. Manual de especificaciones

APÉNDICE D

Tabla de costos de los materiales para la reingeniería del evaporador

Descripción	Costo
Bomba Jet Alta Presión IKW	\$ 1400
Bomba de vacío	\$ 800
Mano de obra	\$ 100
Cambio de tuberías	\$ 250
Rotámetro	\$ 120
Accesorios y materiales de construcción	\$ 880
Panel de control y cableado eléctrico	\$ 200
Acabados	\$ 100
TOTAL	\$ 3850

APÉNDICE E

Apéndice E1. Imágenes durante las modificaciones del evaporador





Apéndice E2. Imágenes durante pruebas experimentales realizadas**Apéndice E3. Imágenes del equipo luego de la reingeniería**

