#### Escuela Superior Politécnica del Litoral

#### Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE AGUA (CHILLER) A UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN A ESCALA PILOTO INGE-2705

### **Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por: Luis Germán Defaz Velarde Clarisse Doménica Zambrano Yela

Tutor:

Wilfrido Quiñónez Becerra, PhD.

Guayaquil - Ecuador 2024

#### **Dedicatoria**

El presente proyecto lo dedico a mi familia. A mis padres Marcos y Emma, sin su apoyo y amor incondicional no hubiera conseguido cumplir mis metas. A mi hermano Marco por ser un excelente hermano mayor y enseñarme siempre con su ejemplo. A mi hermana María Victoria por demostrarme que con resiliencia y paciencia todo se logra.

Luis Germán Defaz Velarde

#### **Dedicatoria**

A la memoria de mi abuelo, *Papá Chicho*. Él siempre me llamó "mi doctora", como si viera un futuro que aún no alcanzaba a imaginar, pero antes de partir tuvo la dicha de llamarme "mi ingeniera", el título que elegí, y en ese último gesto dejó sembrado un sueño aún más alto. Hoy, aunque no esté físicamente, sé que me acompaña desde arriba, orgulloso de cada paso que doy y viendo cómo cumplo todas las metas que alguna vez compartí con él.

A mi mamá, quien ha sido mi mayor apoyo en vida. Este logro es tan suyo como mío, porque ha estado conmigo en cada etapa de mi vida académica. Ha sido mi refugio en este trayecto lleno de emociones: me ha visto feliz y emocionada, pero también estresada y asustada por las exigencias de mi carrera. Fue ella quien, con amor y paciencia, me ayudó a descubrir mi verdadera pasión, iluminando mi camino desde el examen de admisión hasta este día tan especial. Mami, este triunfo lleva tu nombre y tu corazón.

#### Clarisse Doménica Zambrano Yela

#### Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía y acompañarme en cada paso que doy.

A mi padre, por inspirarme a ser ingeniero. Por ser el ejemplo del ser humano y profesional que aspiro a ser.

A mi madre, por su infinito amor. Eres el motor detrás de cada meta alcanzada y refugio donde recobro fuerzas.

A mis hermanos, por ser mis cómplices y hacer de cada etapa de mi vida algo inolvidable.

A mi familia, por ser un pilar fundamental en mi vida, dejándome enseñanzas invaluables. En especial, a mi abuela Emma, cuya fe inquebrantable en mí siempre me impulsó a seguir adelante.

A mis amigos, por su apoyo constante y por recordarme que compartir los momentos hace la vida más especial.

A mis profesores, por brindarme su conocimiento y las herramientas necesarias para alcanzar mis sueños.

#### Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía y fortaleza.

A mis padres, Ing. Chennier e Ing. Dayse, por ser mi mayor inspiración como profesionales y como seres humanos. Cada abrazo y consejo ha sido clave para llegar hasta aquí.

A mi abuela, Dra. Irma Montes "Mirma", quien desde pequeña ha sido mi maestra de vida. Su ejemplo me ha impulsado a dar lo mejor de mí.

A mis hermanos, Ing. Gianella y Chenier, porque su admiración y confianza en mí, incluso en mis momentos de mayor estrés, me dio la fuerza para seguir adelante.

A mi tío, Ing. Víctor Hugo, por ser un apoyo constante en todos mis logros, incluyendo éste. Su guía en mi camino hacia ESPOL fue fundamental.

A mi prima, Ing. Antonella, y mi mejor amiga, Daniela, mis almas gemelas. Poder contar con ustedes ha sido un refugio invaluable.

Y a mis amigas de toda la vida — Karla, Sheila, Ruth e Iudette — por sus palabras de aliento y apoyo incondicional.

#### Clarisse Doménica Zambrano Yela

#### **Agradecimientos**

Agradecemos a nuestros tutores del proyecto, Ing. Wilfrido Quiñónez e Ing. Juan José Álava, por ser guías constantes durante el proceso.

Al Ing. Camilo Ramírez e Ing. Julio Chuiza, por su disposición en LOPU, brindándonos soporte necesario para avanzar nuestro trabajo. A la empresa *Chillers Ecuador S.A.S.*, por su asesoramiento técnico y contribución al

A nuestros profesores, ingenieros — Christopher Varela, Diana Tinoco, Fabián Bermeo, Yris González y Myriam Santos —, que siempre creyeron en nuestro potencial.

desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos, los *Quimikitos* — Rebelo, Renata, Eva, Melanie, Ceci, Joey, Cristhel y Roger —, por hacer de este camino una experiencia más llevadera y llena de buenos momentos.

Finalmente, a nosotros mismos, por ser un equipo sólido desde el primer semestre, apoyándonos mutuamente en cada reto y celebrando juntos cada pequeño logro.

Luis Defaz y Clarisse Zambrano

Declaración Expresa

Nosotros Clarisse Doménica Zambrano Yela y Luis Germán Defaz Velarde acordamos y

reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de

graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este

acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra

con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la

creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de

participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención,

modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada

que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo

tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de

graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del

porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la

explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la

ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los

resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la

autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.

Clarisse Doménica

Zambrano Yela

Luis Germán Defaz

huis Jefoz

Velarde

Eval	heul	ores
17 V 21	เแสน	WI 62

María Verónica Ordóñez
Pazmiño, MSc.

Profesor de Materia

Wilfrido Hernán Quiñónez Becerra, Ph.D.

Tutor de proyecto

I

Resumen

Una columna de absorción a escala piloto captura solamente el 0.1% del dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>) empleado. Este proyecto tuvo como objetivo diseñar, construir e implementar un sistema

de refrigeración tipo chiller para enfriar el agua y, así, aumentar la captura de CO<sub>2</sub>.

El diseño del chiller se realizó mediante ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de los

equipos necesarios, y la construcción se trabajó junto a técnicos especialistas en refrigeración.

Para aumentar la absorción en la columna se basó en el principio de solubilidad de un gas en

líquido.

Tras implementar el chiller, se corrió la columna de absorción con agua a 9 °C, se alcanzó en

el 0.96% de captura del CO2, representa un incremento del 800% con respecto a temperatura

ambiente. En cuanto a la eficiencia energética del equipo de refrigeración, se alcanzó un COP

de 3.5.

Al reducir la temperatura del agua a 9°C, la absorción de CO2 mejoró del 0.1% (25 °C) al

0.96% (9 °C), acercándose al 1.2% reportado en literaturas, validando su efectividad y

potencial industrial. El sistema de refrigeración alcanzó un COP promedio de 3.5,

clasificándose como Clase A en eficiencia energética, con un consumo eléctrico estable y

sostenible.

Palabras Clave: Chiller, Dióxido de carbono, Solubilidad, COP, Absorción

II

Abstract

A pilot-scale absorption column captures only 0.1% of the carbon dioxide (CO2) used. The

objective of this project is to design, construct and implement a chiller-type cooling system to

cool the water and, thus, increase the capture of  $CO_2$ .

The design of the chiller was carried out using design equations for the sizing of the necessary

equipment, and the construction was performed with technical specialists in refrigeration. To

increase the absorption in the column was based on the principle of solubility of a gas in liquid.

After implementing the chiller, the absorption column was run with water at 9 °C, and a CO2

capture rate of 0.96% was achieved, representing an increase of 800% compared to ambient

temperature. As for the energy efficiency of the refrigeration equipment, a COP of 3.5 was

achieved.

By reducing the water temperature to 9°C, CO<sub>2</sub> absorption improved from 0.1% (25 °C) to

0.96% (9 °C), approaching the 1.2% reported in the literature, validating its effectiveness and

industrial potential. The refrigeration system achieved an average COP of 3.5, classifying it

as Class A in energy efficiency, with stable and sustainable power consumption.

**Keywords**: Chiller, Carbon dioxide, Solubility, COP, Absorption

# Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	X
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema	2
1.2 Justificación del Problema	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 Fundamento de la Absorción de Gases	5
1.4.2 Uso de Columnas Empacadas en Procesos de Captura de CO <sub>2</sub>	6
1.4.3 Impacto de la Temperatura en la Solubilidad de Gases	6
1.4.4 Enfriamiento en Procesos de Absorción de CO <sub>2</sub>	7
1.4.5 Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor	7

Capítulo 2	10
2. Metodología	11
2.1. Selección del sistema de refrigeración	11
2.1.1. Alternativas de componentes internos	12
2.1.2. Selección del refrigerante	13
2.2. Diseño conceptual del sistema	13
2.2.1. Cálculo de carga térmica total requerida	14
2.2.2. Simulación del ciclo termodinámico del refrigerante	15
2.2.3. Cálculo de capacidades de cada componente	17
2.3. Diseño detallado y construcción del chiller	20
2.3.1. Recursos y criterios de diseño y construcción	21
2.3.2. Esquema del equipo	22
2.3.3. Implementación del chiller a la columna de absorción	23
2.4. Evaluación experimental	25
2.4.1. Pruebas preliminares	25
2.4.2. Medición de la eficiencia de absorción	26
2.4.3. Cálculo de COP real	28
2.5. Estimación de costos	29
2.1.1 Estimación de costos de fabricación	30
2.1.2 Estimación de costos de implementación	30
2.1.3 Estimación de costos de operación	30

Capítulo 3	31
3. Resultados y Análisis	32
3.1 Diseño y dimensionamiento del chiller	32
3.1.1. Resultados del dimensionamiento	32
3.1.2. Componentes internos seleccionados	34
3.1.3. Vista final del equipo	35
3.2. Coeficiente de rendimiento del chiller	39
3.3. Resultados de pruebas de absorción	40
3.4. Costos estimados	47
Capítulo 4	48
4. Conclusiones y recomendaciones	49
4.1. Conclusiones	49
4.2 Recomendaciones	50
Referencias	52

#### Abreviaturas

**ASHRAE** Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción

**COP** Coefficient of Performance o Coeficiente de Rendimiento

EES **Engineering Equation Solver** 

Escuela Superior Politécnica del Litoral **ESPOL** 

**LOPU** Laboratorio de Operaciones Unitarias

LPM Litros Por Minuto

R410a

PFD Process Flow Diagram o Diagrama de Flujo de Proceso

Refrigerante hidrofluorocarbonado utilizado principalmente en sistemas de

R134a refrigeración y aire acondicionado automotriz (HFC-134a)

> Refrigerante hidroclorofluorocarbonado usado en sistemas de aire

R22 acondicionado y refrigeración (HCFC-22)

Refrigerante mezcla de hidrofluorocarbonos utilizado en sistemas de

refrigeración y aire acondicionado

#### Simbología

A Área de transferencia

CO<sub>2</sub> Dióxido de Carbono

Cp Calor específico

D Diámetro

g Gramo

Gr Número de Grashof

G<sub>m</sub> Flujo de gas en el proceso de absorción

h Entalpía específica

H<sup>+</sup> Ión hidrógeno

HCl Ácido clorhídrico

HP Horse Power o caballo de fuerza

i Corriente eléctrica

J Joule

k Conductividad térmica

K Grados Kelvin

kg Kilogramo

kJ Kilojoule

kW Kilowatts

L Litros

L<sub>m</sub> Flujo de líquido en el proceso de absorción

m Metros

m<sup>2</sup> Metros cuadrados

mg CaCO<sub>3</sub> Miligramos de Carbonato de Calcio

mL Mililitro

Nu Número de Nusselt

P Presión

pH Potencial de Hidrógeno

Pr Número de Prandtl

Q Calor

Ra Número de Rayleigh

Re Número de Reynolds

T Temperatura

U Coeficiente global de transferencia de calor

v Voltaje

V Volumen

W Watts

x<sub>1</sub> Fracción molar de CO<sub>2</sub> a la salida del líquido

x<sub>2</sub> Fracción molar de CO<sub>2</sub> a la entrada del líquido

y<sub>1</sub> Fracción molar de CO<sub>2</sub> a la entrada del gas

y<sub>2</sub> Fracción molar de CO<sub>2</sub> a la salida del gas

% Porcentaje

Δ Diferencial o delta

°C Grados Celsius

ŋ Eficiencia

ρ Densidad

μ Viscosidad dinámica

v Viscosidad cinemática

*W* Potencia

# Índice de figuras

Figura 1 Ciclo de Refrigeración	8
Figura 2 Esquema de metodología del proyecto	11
Figura 3 Ciclo termodinámico del R410-A	16
Figura 4 Asistencia en ensamblaje del chiller	21
Figura 5 Elaboración del Diagrama 3D del equipo	23
Figura 6 Referencia de las conexiones del chiller	24
Figura 7 Instalación del aislante Rubatex	24
Figura 8 Prueba con tanque aislado	25
Figura 9 Medición de amperaje	29
Figura 10 Compresor hermético rotativo	34
Figura 11 Evaporador de inmersión tubular	34
Figura 12 Condensador de aluminio y cobre	35
Figura 13 Dispositivo de expansión	35
Figura 14 Diagrama inicial del chiller	36
Figura 15 Vistas del equipo en 3D	36
Figura 16 Ensamblaje del equipo	37
Figura 17 Chiller construido	38
Figura 18 Esquema del proceso de absorción con chiller implementado	38
Figura 19 Chiller implementado a la columna de absorción	39
Figura 20 Gráficos de pH vs. tiempo	42
Figura 21 Gráficos de Alcalinidad vs. tiempo	44
Figura 22 Gráfico de comparación de porcentaje de absorción en diferentes pruebas	46

## Índice de tablas

Tabla 1 Resultados de la carga térmica	32
Tabla 2 Propiedades del ciclo termodinámico del refrigerante	32
Tabla 3 Capacidad de los componentes del chiller	33
Tabla 4 Características del compresor	34
Tabla 5 Resultados de COP con pruebas de enfriamiento	39
Tabla 6 Condiciones iniciales de las pruebas de absorción	40
Tabla 7 Resultados de pruebas de absorción a diferentes temperaturas	40

# Capítulo 1

#### 1. Introducción

#### 1.1 Descripción del Problema

Dentro del laboratorio de operaciones unitarias de la ESPOL, el proceso de absorción de CO<sub>2</sub> se realiza utilizando una columna de absorción empacada que emplea agua como medio absorbente. Actualmente, el agua se introduce a temperatura ambiente, lo que limita la solubilidad del gas a 1.58 g CO<sub>2</sub>/kg de agua. Esta baja solubilidad impide que se maximice el porcentaje de absorción del proceso puesto que llega hasta un 0.108% CO<sub>2</sub> absorbido dentro del agua (García Suárez & Reyes Vera, 2015). Esto conlleva a un menor rendimiento en la captura del gas, la condición representa una barrera significativa, ya que impide aumentar la eficiencia del proceso de absorción, lo que resulta en una baja captación de CO<sub>2</sub>.

Debido a la limitada cantidad de CO<sub>2</sub> captada, los instrumentos de medición utilizados, como los medidores de pH y los procedimientos de titulación, no detectan cambios significativos en la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto. Como resultado las lecturas de titulación muestran variaciones pequeñas de consumo de ácido clorhídrico teniendo un promedio de 1.5 ml, lo que genera incertidumbre en los resultados obtenidos. Esta incapacidad para registrar cambios palpables en la absorción compromete la confiabilidad de los datos y limita la capacidad del laboratorio para realizar análisis precisos y consistentes.

Para mejorar este escenario, se propone la implementación de un sistema de refrigeración de agua (chiller) que permita reducir la temperatura del agua utilizada en la columna de absorción hasta los 5°C. A esta temperatura, la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua aumenta a 2.86 g CO<sub>2</sub>/kg de agua, lo que representa un incremento significativo con respecto a las condiciones actuales (Carroll, Slupsky & Mather, 1991). Esto no solo incrementaría la eficiencia de captura de CO<sub>2</sub>, sino que también permitiría a los operadores del equipo trabajar con datos más palpables, fiables y reproducibles.

El problema afecta directamente a las personas que operan la columna de absorción, ya que la falta de control sobre la temperatura limita la comprensión de las dinámicas de absorción y afecta la reproducibilidad de los experimentos. Este desafío es especialmente importante en estudios donde la eficiencia de captura de gases es crítica, tales como la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero o la optimización de procesos de captura de carbono. Por tanto, la incorporación de un sistema de refrigeración representa no solo una mejora técnica, sino también un paso necesario para avanzar en la formación académica y en la capacidad del laboratorio para desarrollar investigaciones más precisas y relevantes.

#### 1.2 Justificación del Problema

La construcción de un sistema de refrigeración de agua (chiller) para reducir la temperatura del agua en la columna de absorción de CO<sub>2</sub> es la opción más viable para mejorar el proceso de absorción debido a los fundamentos teóricos de absorción y de transferencia de masa. En este tipo de procesos, la absorción de gases en líquidos está gobernada por la ley de Henry, que establece que la cantidad de gas que se disuelve en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas y está influenciada por la temperatura del líquido (Valencia, 2019). A menor temperatura, la solubilidad del gas en el líquido aumenta, lo que resulta en una mayor captación de CO<sub>2</sub> en el agua.

Actualmente, el agua utilizada en la columna de absorción se encuentra a temperatura ambiente (25 °C), lo que limita la solubilidad del CO<sub>2</sub> a 1.58 g CO<sub>2</sub>/kg de agua. Esta baja solubilidad reduce el porcentaje de absorción del gas, lo que provoca que se limita la capacidad para realizar mediciones precisas, confiables y reproducibles. Al implementar un chiller que permita reducir la temperatura del agua hasta los 5°C, se incrementa la solubilidad del CO<sub>2</sub> hasta 2.86 g CO<sub>2</sub>/kg de agua, lo que representa una mejora significativa en la capacidad de absorción.

El fenómeno de absorción implica la transferencia de CO<sub>2</sub> desde la fase gaseosa a la fase líquida, donde el gas se disuelve en el agua. La eficiencia de este proceso está determinada por la diferencia de concentración entre la fase gaseosa y la fase líquida (gradiente de concentración) y por el coeficiente de transferencia de masa, el cual es inversamente proporcional a la temperatura (Wankat, 2012). Al reducir la temperatura del agua, no solo se incrementa la solubilidad, sino que también se genera un mayor gradiente de concentración entre el gas y el líquido, lo que facilita la transferencia de CO<sub>2</sub> al agua. Además, a menor temperatura, la energía cinética de las moléculas de CO<sub>2</sub> disminuye, lo que reduce la tendencia del gas a escapar del líquido una vez disuelto. Este comportamiento mejora la estabilidad del CO<sub>2</sub> absorbido en el agua, asegurando que una mayor fracción del gas permanezca en la fase líquida, lo que contribuye a una absorción más efectiva (Diamond & Akinfiev, 2003).

Alternativas como aumentar la presión del sistema para mejorar la absorción es inviable, puesto que la columna empacada es de acrílico por lo tanto no podría soportar las presiones que sería sometida, además el utilizar presiones elevadas conlleva a exponer a riesgos de seguridad peligrosos. Otra opción es ajustar la química del agua mediante el uso de reactivos químicos, implicaría una inversión constante en compra de reactivos controlados con precios elevados, también arriesga la seguridad del operador. Por el contrario, la reducción de la temperatura a través de un chiller es una solución técnica eficiente y sostenible que permite un control directo sobre una variable clave (la temperatura), sin comprometer la integridad del proceso ni alterar los parámetros operacionales.

En resumen, la instalación de un chiller no solo optimiza la solubilidad del CO<sub>2</sub>, sino que también mejora significativamente la eficiencia del proceso de absorción al favorecer la transferencia de masa. Esto proporciona un entorno más controlado y adecuado para obtener datos precisos, reduciendo la incertidumbre en las mediciones y ofreciendo una solución viable y segura en el contexto del laboratorio de operaciones unitarias.

#### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Mejorar la eficiencia del proceso de absorción de CO<sub>2</sub> en una columna empacada a escala piloto mediante la implementación de un sistema de refrigeración de agua que permita aumentar el porcentaje de captura de CO<sub>2</sub> a temperaturas más bajas con el fin de lograr una mayor retención del gas.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y dimensionar el sistema de refrigeración (chiller) en función de la carga térmica y la capacidad requerida por la columna de absorción para su gestión en la construcción del equipo.
- Calcular el Coeficiente de Rendimiento (COP) como indicador clave del ciclo de refrigeración, para evaluar la eficiencia energética y la capacidad de enfriamiento del equipo implementado.
- Realizar la puesta en marcha del chiller en conjunto con la columna de absorción, asegurando su correcto funcionamiento y preparando una guía de operación para su uso en el laboratorio.

#### 1.4 Marco teórico

#### 1.4.1 Fundamento de la Absorción de Gases

Absorción es un procedimiento unitario utilizado considerablemente dentro de la industria química, donde uno o más componentes de una corriente de gas son eliminados por medio de su transferencia a un solvente no volátil. El gas es capturado a través de procesos como puede ser la absorción física o química en donde este solvente tiene acción como agente separador. Considerando la absorción física, el gas es disuelto en el solvente con ayuda del gradiente de solubilidad que tienen estos elementos. En su lugar, la absorción química retiene

el gas en solución mediante una reacción entre este y el solvente, garantizando así más estabilidad. (Wankat, 2012)

Uno de los métodos que más se tienen en cuenta en materia de tratamiento de CO<sub>2</sub> es la absorción de este. La importancia de este método radica en la reducción del impacto ambiental que tiene la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera a través de fuentes como el gas natural y la combustión, mitigando así el avance del calentamiento global.

#### 1.4.2 Uso de Columnas Empacadas en Procesos de Captura de CO2

En campos como la industria y la investigación científica, uno de los procedimientos más utilizados para la captura de CO<sub>2</sub> son las columnas empacadas. Estas columnas mejoran la eficiencia de absorción debido a que poseen un empaque que consiste en una gran superficie de contacto entre el gas y el líquido, ampliando así la interfase entre ambas. En materia industrial, la eficiencia de absorción de CO<sub>2</sub> es de suma relevancia, por lo que estos equipos son comunes para procesos que involucren esta acción como la eliminación de gases contaminantes y captura de carbono. (Cengel & Ghajar, 2011)

#### 1.4.3 Impacto de la Temperatura en la Solubilidad de Gases

La temperatura del solvente es inversamente proporcional a la eficiencia del proceso de absorción determinado. Esto se traduce en la ley de Henry que menciona que a medida que la temperatura del líquido disminuye, la cantidad de gas que se disuelve en un líquido aumenta. El gradiente de concentración entre el CO<sub>2</sub> gaseoso y el agua alcanza su punto óptimo al reducir la temperatura de este último, facilitando así una mayor captación de gas ya que su tendencia a escapar del líquido se vería considerablemente disminuido; a su vez, aumenta la estabilidad de la solución utilizada. (Valencia, 2019)

Un campo en el que se valora la utilización de columnas empacadas es la educación, donde se requiere que los estudiantes puedan observar distintos procesos de absorción de gases

en condiciones controladas. No obstante, la absorción de CO<sub>2</sub> suele ser baja en este contexto debido a su solubilidad escasa en agua. Esto ha motivado la exploración de técnicas adicionales que implican la modificación de factores como la temperatura y la presión, listando, por ejemplo, el enfriamiento del agua o la alteración química del solvente. Estas técnicas mejoran la eficiencia de captura de CO<sub>2</sub> en sistemas de absorción. (Franchini, Notarbartolo, Padovan, & Perdichizzi, 2015)

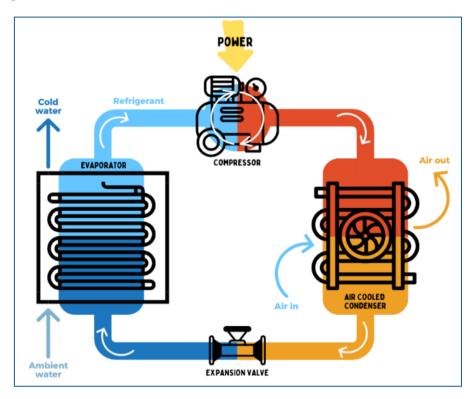
#### 1.4.4 Enfriamiento en Procesos de Absorción de CO2

Una técnica eficiente para incrementar la absorción de CO<sub>2</sub> en medios acuosos ampliamente utilizada en la industria y la academia es la reducción de la temperatura del solvente. Esto se debe a que, al disminuir la temperatura, aumenta la capacidad de disolución del gas en el líquido mejorando así la precisión de los resultados obtenidos. Estudios referentes al tratamiento de gases han utilizado enfriadores o chillers para aumentar la eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub> en procesos específicos, como el uso de columnas empacadas. (Momin, Jadhav, Gawade, & Chaskar, 2016)

#### 1.4.5 Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor

El sistema de refrigeración se basa en un ciclo de compresión de refrigerante, en el que el refrigerante circula en un sistema cerrado, extrayendo calor del agua en el evaporador. El ciclo comienza con la compresión del refrigerante en un compresor. Aquí, el refrigerante gaseoso se comprime, aumentando su presión y temperatura. Este gas caliente y a alta presión se mueve al siguiente componente del sistema, el condensador. En el condensador, el refrigerante a alta presión libera el calor que había absorbido previamente, transfiriéndolo al ambiente exterior. Este proceso convierte el refrigerante en un líquido de alta presión. Al liberar este calor, el refrigerante se enfría lo suficiente para pasar al siguiente paso. (Conforempresarial, 2020)

**Figura 1**Ciclo de Refrigeración



Nota. Fuente: Elaboración propia en Canva

El refrigerante líquido pasa por un instrumento de expansión, donde su presión se reduce repentinamente, provocando una caída brusca en su temperatura. Este líquido frío y de baja presión es ahora capaz de absorber calor en la siguiente etapa. En el evaporador, el refrigerante extrae el calor del agua que circula en la columna de absorción. A medida que el refrigerante absorbe el calor del agua, la temperatura del agua disminuye, llegando a temperaturas bajas deseadas. Durante este proceso, el refrigerante vuelve a convertirse en gas y el ciclo comienza nuevamente. (Almendariz Llanos & Lara Gavilanes, 2014)

#### 1.4.5.1 Impacto del Refrigerante

Un factor importante a considerar en el proceso de enfriamiento es el refrigerante, especialmente en términos de eficiencia y el impacto ambiental de los sistemas de refrigeración. Inicialmente, se utilizaban ampliamente refrigerantes como el R-22 hasta que se demostró que tenían efectos negativos sobre la capa de ozono, lo que llevó a una disminución

en su uso. En la actualidad, se han desarrollado alternativas más sostenibles con menor impacto ambiental, es así como surgió el R-410A. Este refrigerante no ocasiona daños en la capa de ozono, lo que lo convierte en una opción favorable frente a sus predecesores al ofrecer un equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad. (Rani et al., 2017)

# Capítulo 2

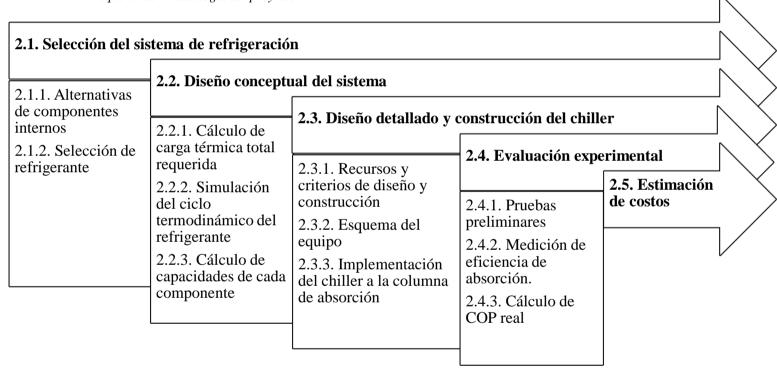
#### 2. Metodología

Se planteó una metodología basada en el diseño, implementación y evaluación del sistema de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, con la finalidad de resolver la problemática planteada y cumplir con los objetivos del proyecto.

En el siguiente diagrama, se muestra un esquema general del proceso llevado a cabo, el cual permite visualizar de manera clara las etapas del proceso y su interrelación:

Figura 2

Esquema de metodología del proyecto



A continuación, se describen en detalle cada una de las fases y actividades realizadas.

#### 2.1. Selección del sistema de refrigeración

El diseño del chiller tuvó su base en la implementación de un ciclo de comprensión de vapor que, debido a su simplicidad y alta capacidad de adaptación a diferentes escalas de operación, es ampliamente utilizado.

Se concluyó que el ciclo de compresión de vapor es la mejor alternativa frente a otras opciones, como los ciclos de absorción. Estos últimos fueron descartados debido a su mayor complejidad y costo de implementación. En contraste, el sistema seleccionado ofrece un equilibrio óptimo entre eficiencia, costo y simplicidad en su implementación.

#### 2.1.1. Alternativas de componentes internos

#### Compresor

Dado que este proyecto corresponde a un sistema pequeño, se optó por utilizar un compresor hermético. Este tipo de compresor reduce los riesgos de fugas de refrigerante y disminuye el ruido operativo, ya que integra la unidad motora y la de compresión en un conjunto sellado, compacto y confiable, lo que facilita su mantenimiento. También se consideró el uso de un compresor semihermético, pero esta opción fue descartada debido a su mayor costo de implementación. (EMBRACO, 2021)

#### **Evaporador**

La opción seleccionada, debido a su alta eficiencia en la transferencia de calor y su capacidad para trabajar con fluidos líquidos como el agua, fue un evaporador de inmersión tubular. Además, este diseño es óptimo para sumergirse en el tanque de agua del chiller, lo que confirmó su elección frente a otras alternativas, como los evaporadores de placas o de carcasa. (Ortolá, Tomas Egea, Fito Soñer, & Castro Giráldez, 2018)

#### Condensador

Se optó por la implementación de un condensador de aire forzado, ya que este utiliza ventiladores para disipar el calor al ambiente. Otra alternativa considerada fue el uso de un condensador enfriado por agua, pero al tratarse de un sistema pequeño, esta opción fue descartada debido a que implicaba la necesidad de adicionar agua a la operación, lo que complicaba el diseño y aumentaba los costos.

#### Elemento de expansión

Se decidió utilizar un capilar de expansión, ya que ofrece un control eficiente del flujo de refrigerante a bajas capacidades, lo que lo hace ideal para el tamaño del chiller. Esta elección permitió un ahorro en la inversión, ya que evitó la necesidad de componentes más complejos, como una válvula de expansión típica de sistemas industriales.

#### 2.1.2. Selección del refrigerante

Como primera opción, se contempló el uso del R-134A debido a su bajo costo, simplicidad de manejo y su uso extendido en la formación académica de los estudiantes de ingeniería química, lo que resulta relevante al considerar una conexión educativa directa. Sin embargo, algunas limitaciones en términos de eficiencia térmica llevaron a buscar opciones más avanzadas que pudieran superar estas falencias. (Carreño Barrera & Jadán Lucero, 2013)

Finalmente, se optó por el R-410A, que ofrece una mayor capacidad de refrigeración y mejores características termodinámicas en comparación con el refrigerante previamente considerado. Así, se concluyó que el R-410A es el más adecuado para un sistema compacto como el implementado, ya que permite operar a presiones más altas, lo que incrementa la eficiencia del ciclo.

#### 2.2. Diseño conceptual del sistema

En esta etapa se desarrolló el diseño conceptual del sistema de refrigeración mediante el uso de ecuaciones de transferencia de calor y principios de termodinámica (Cengel & Boles, 2012). Estos fundamentos permitieron dimensionar el equipo de manera precisa, considerando los requisitos específicos de carga térmica y capacidad de enfriamiento necesarios para el proceso de absorción en la columna empacada.

#### 2.2.1. Cálculo de carga térmica total requerida

Para determinar la carga total de refrigeración, se consideraron los siguientes elementos: la carga del producto (agua), las cargas por servicio, y un factor de seguridad.

#### Carga del producto

Se calculó la energía requerida para enfriar el agua desde su temperatura inicial, hasta la temperatura objetivo. Como el agua no alcanza su punto de congelación, únicamente se consideró el calor sensible. Este cálculo se realizó mediante la ecuación:

$$Q_1 = mC_p(T_o - T_{enf}) Eq. 2.1$$

Donde:

m = masa de agua a enfriar [kg]

 $C_p = Calor$ específico del agua [kJ/kg·°C]

 $T_o$  = Temperatura inicial de agua [°C]

 $T_{enf}$  = Temperatura a enfriar de agua [°C]

#### Carga de servicio

Se incluyó un incremento adicional del 40% a la carga del producto  $(q_1)$  para considerar posibles demandas adicionales del sistema en momentos específicos. Este ajuste se representó con:

$$q_2 = 40\%q_1$$
 Eq. 2.2

#### Factor de seguridad

Para compensar discrepancias entre los criterios de diseño y las condiciones reales de operación, se añadió un 10% adicional sobre la suma de  $q_1$  y  $q_2$ :

$$fs = 10\%(q_1 + q_2)$$
 Eq. 2.3

Finalmente, la carga total de refrigeración se calculó sumando todas las contribuciones:

$$q_{total} = q_1 + q_2 + fs Eq. 2.4$$

#### 2.2.2. Simulación del ciclo termodinámico del refrigerante

En primer lugar, fue fundamental establecer las temperaturas de evaporación y condensación, ya que estos parámetros determinaron las condiciones operativas del ciclo de refrigeración.

De acuerdo con el *Manual de Refrigeración* de Franco Lijó (2012), "si el fluido a enfriar es líquido, esa diferencia de temperaturas (salto térmico) es del orden de 5-15°C" (p. 113). Para este diseño, se consideró un salto térmico de 15°C, calculado mediante la ecuación:

$$T_{evap} = T_{enf} - \Delta T_H$$
 Eq. 2.5

Donde:

T<sub>enf</sub> = Temperatura de fluido a enfriar en el evaporador [°C]

 $\Delta T_H = \text{Salto térmico establecido } [^{\circ}C]$ 

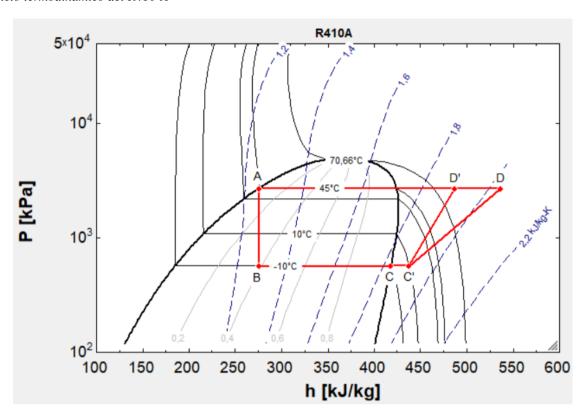
Para condensadores de tubo y aletas con convección forzada, la temperatura de condensación es 15°C superior a la temperatura del aire circundante (Franco Lijó, 2012, p. 86). Considerando que la temperatura máxima promedio en la ciudad de Guayaquil es de 30°C (Weather Spark, 2024), la temperatura de condensación se calculó como:

$$T_{cond} = T_{air} + 15$$
°C Eq. 2.6

Con las temperaturas de condensación y evaporación previamente definidas, se procedió a modelar el ciclo termodinámico utilizando el programa EES (Engineering Equation Solver).

Figura 3

Ciclo termodinámico del R410-A



En el diagrama de presión versus entalpía (P vs. h), se ilustra el ciclo del refrigerante R-410<sup>a</sup>. A continuación, se realiza el análisis del comportamiento del sistema dentro de cada punto del ciclo de refrigeración:

- Estado C: Vapor saturado. El vapor está a la temperatura y presión en la que coexisten
   las fases líquida y vapor. La calidad del vapor es de 1 (100% vapor).
- Estado C': Vapor sobrecalentado. El vapor ha sido calentado más allá de su temperatura de evaporación en 20 °C antes de entrar al compresor, y se calculó su energía por unidad de masa considerando la presión en la que ocurre la evaporación.
- Estado D': Vapor sobrecalentado, la entalpía específica D' se calculó a la presión de condensación y la entropía específica constante, es decir, considerando un proceso isentrópico entre C' y D'.
- Estado D: Vapor sobrecalentado, la entalpía específica en el punto D (valor real) se calculó con la siguiente ecuación, donde la eficiencia isentrópica se consideró el valor

a 0.5 por ser un compresor hermético y la entalpía específica ya calculada en el punto D'.

$$\eta_{sc} = \frac{h'_D - h_{C'}}{h_D - h_{C'}}$$
 Eq. 2.7

- Estado A: Líquido saturado, la entalpía específica en el punto A se calculó a la presión de condensación y la calidad del vapor 0. (100 % líquido).
- Estado B: Mezcla, la entalpía específica en el punto B es la misma que la entalpía específica en el punto A debido a que es un proceso isoentálpico y no se genera ningún trabajo. La calidad de vapor en este punto se calculó con:

$$x = \frac{h_B - h_f}{h_q - h_f}$$
 Eq. 2.8

#### 2.2.3. Cálculo de capacidades de cada componente

Los valores de entalpía en cada punto del ciclo de refrigeración, que se obtuvieron a partir del análisis termodinámico del ciclo, permitieron calcular algunos calores por unidad de masa en las etapas principales del sistema.

$$q_{evap} = h_C' - h_B Eq. 2.9$$

$$q_{cond} = h_D - h_A Eq. 2.10$$

$$w_{comp} = h_D - h_C' Eq. 2.11$$

Donde:

q<sub>evap</sub> = Calor absorbido en el evaporador [kJ/kg]

q<sub>cond</sub> = Calor desprendido por el condensador [kJ/kg]

 $w_{comp}$  = Trabajo real del compresor [kJ/kg]

El Coefficient of Performance (COP) teórico se determinó como una medida de la eficiencia del sistema, considerando el calor absorbido en el evaporador y el trabajo del compresor:

$$COP = \frac{q_{evap}}{w_{comp}}$$
 Eq. 2.12

#### 2.2.3.1. Capacidad del compresor

La potencia necesaria para el funcionamiento del compresor se calculó utilizando la carga térmica total del ciclo  $(q_{total})$  y el COP teórico. La relación empleada fue:

$$\dot{W}_{comp} = \frac{q_{total}}{COP}$$
 Eq. 2.13

Luego, considerando una eficiencia mecánica ( $\eta_{mec}$ ) aproximada de 0.9, se calculó la potencia necesaria del motor para compensar pérdidas mecánicas y suministrar energía requerida al compresor. La expresión utilizada fue:

$$\dot{W}_{motor} = \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_{mec}}$$
 Eq. 2.14

#### 2.2.3.2. Capacidad del evaporador

La resolución del área de transferencia de calor fue de suma relevancia en el diseño del evaporador, ya que garantiza que el intercambiador pueda absorber el calor necesario, manteniendo el ciclo en condiciones óptimas. Por lo tanto, se procedió con el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U). Siguiendo el modelo de resistencias térmicas, se asumió que las resistencias de la pared del tubo y de las aletas son despreciables en comparación con las resistencias convectivas, lo que llevó a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$
 Eq. 2.15

Donde:

h<sub>i</sub>: Coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado interno (fluido en movimiento dentro del tubo).

h<sub>o</sub>: Coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado externo (fluido estático o en movimiento fuera del tubo).

Para encontrar los valores de coeficientes de transferencia de calor por convección, se usó el concepto del número de Nusselt:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$
 Eq. 2.16

Se utilizó la correlación de Dittus-Boelter de convección interna para el flujo de refrigerante R410a dentro de los tubos, común para flujos turbulentos en tubos lisos. Además, otras relaciones fueron necesarias para completar este cálculo:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3} Eq. 2.17$$

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu}$$
 Eq. 2.18

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k}$$
 Eq. 2.19

Cabe recalcar que todas las propiedades son del refrigerante R104-A, las cuales fueron encontradas en el libro de Cengel y en la ficha técnica del producto.

Para la transferencia de calor por convección en el lado del agua (exterior del tubo), se usaron correlaciones de convección para flujos externos, como la de Churchill-Chu para convección natural sobre superficies horizontales:

$$Nu = \left(0.60 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right)^{2}$$
Eq. 2.20

Y se usaron otras correlaciones como:

$$Ra = Gr \cdot Pr$$
 Eq. 2.21

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})D^3}{v^2}$$
 Eq. 2.22

Donde:

 $\beta$  = Coeficiente de expansión térmica del agua

 $T_s$  = Temperatura de la superficie (enfriamiento) [°C]

 $T_{\infty}$  = Temperatura del fluido al inicio [°C]

v = Viscosidad cinemática del agua

Finalmente, para hallar el área de transferencia se usó la siguiente ecuación de transferencia de calor:

$$A = \frac{q_1}{U\Delta T_{lm}}$$
 Eq. 2.23

Donde:

 $\Delta T_{lm}$  = Diferencial de temperatura logarítmica, calculada como:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\left(T_o - T_{evap}\right) - \left(T_{enf} - T_{evap}\right)}{\ln\left(\frac{T_o - T_{evap}}{T_{enf} - T_{evap}}\right)}$$
Eq. 2.24

## 2.2.3.4. Capacidad del condensador

La potencia del condensador representa la cantidad de calor que se rechaza al ambiente. Esta potencia es generalmente mayor que la del compresor. Por balance de energía, el calor que entra al sistema (en el evaporador) más el trabajo añadido (por el compresor) debe ser igual al calor que sale del sistema (en el condensador).

$$Q_{cond} = q_{total} + W_{comp} Eq. 2.25$$

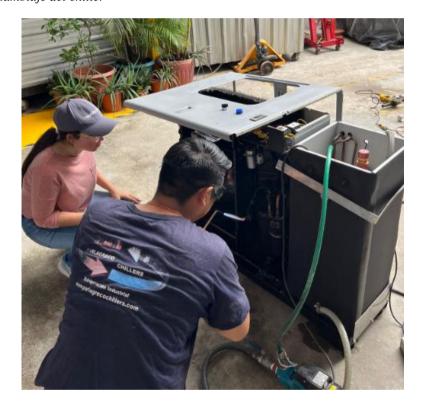
### 2.3. Diseño detallado y construcción del chiller

Esta sección abarca el desarrollo completo del chiller, desde la selección de sus componentes principales hasta su ensamblaje e implementación.

### 2.3.1. Recursos y criterios de diseño y construcción

Para garantizar una alta eficiencia, seguridad y funcionalidad del chiller, desde su diseño y construcción se siguieron estrictas normativas y criterios técnicos de la profesión, con la asesoría imprescindible de *Chillers Ecuador S.A.S.*, una empresa especializada en sistemas de refrigeración. Además, esta empresa contribuyó al ensamblaje del equipo a partir de su diseño inicial, proporcionando retroalimentación valiosa al proyecto.

**Figura 4**Asistencia en ensamblaje del chiller



Con respecto a las capacidades de los componentes, se decidió que la potencia del compresor, con el objetivo de proporcionar un margen de operación adecuado para cubrir las variaciones en las condiciones de trabajo, debía ser ligeramente superior a la potencia calculada, asegurando así el correcto desempeño del sistema.

Por otro lado, considerando las propiedades térmicas, mecánicas y de resistencia necesarias para el correcto funcionamiento del chiller, se realizó la siguiente selección de materiales:

- Cobre: Usado en el condensador por su alta conductividad térmica, permitiendo una transferencia eficiente de calor al ambiente.
- Aluminio: Utilizado en las aletas del condensador por su ligereza, resistencia a la corrosión y capacidad para maximizar el intercambio térmico.
- Acero inoxidable: Utilizado en el evaporador debido a su resistencia estructural y su capacidad para soportar tanto el fluido refrigerante como el agua, evitando problemas de corrosión.

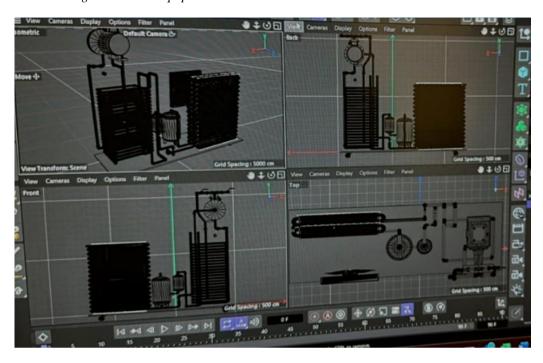
En términos de seguridad, fue necesaria la implementación de un sistema de control de temperatura que asegurara la operación óptima del equipo. De manera resumida, cuando el agua alcanza la temperatura deseada, este sistema apaga automáticamente el chiller, protegiendo su rendimiento al evitar el sobre enfriamiento y el desperdicio de energía. Como medida adicional, se recomendó la instalación de una bomba de recirculación de agua para garantizar que el proceso de enfriamiento sea continuo.

Adicionalmente, se incorporó el aislamiento térmico en el tanque de evaporación para minimizar las pérdidas de calor, y una base con ruedas para facilitar la movilidad del equipo dentro del laboratorio.

## 2.3.2. Esquema del equipo

Luego de los cálculos respectivos y la definición de los criterios de diseño del chiller, se continuó con el desarrollo del diseño final del equipo, el cual integró también las especificaciones técnicas y las mejoras sugeridas por *Chillers Ecuador S.A.S.* Para ello, se utilizó el programa *Cinema 4D*, que es adecuado para la maquetación de esquemas de sistemas industriales.

**Figura 5**Elaboración del Diagrama 3D del equipo



### 2.3.3. Implementación del chiller a la columna de absorción

Una vez terminado el equipo con las especificaciones requeridas en el diseño se procedió a realizar la adecuación del equipo a la columna de absorción. El espacio adecuado para el funcionamiento del equipo es junto a la columna de absorción donde se encontraba el extractor líquido-líquido, esto permite tener acceso a las tomas de agua y de energía necesarias. Teniendo esto en cuenta se adaptó el enchufe del chiller a uno de tipo "chino" de 220v para que sea compatible con el tomacorriente del laboratorio.

Se realizó adaptaciones en al sistema de recirculado de agua del chiller el cual contó con las siguientes modificaciones: una llave regulable de flujo de ½" para contralar el flujo a la salida de la bomba, una manguera que va conectada de la salida del chiller a la cisterna de la columna de absorción y otra que va desde el sistema de recirculación de la columna al chiller, esto permite que exista un sistema de recirculación continuo del agua para su refrigeración.

**Figura 6**Referencia de las conexiones del chiller



Por último, se realizó la instalación del aislante para el tanque cisterna de 250 litros de la columna de absorción. El material que se utilizó fue planchas de espuma "Rubatex" la cual permite aislar efectivamente las paredes de la cisterna, debido a su facilidad en la adherencia a la superficie y maleabilidad a la geometría de la cisterna.

Figura 7

Instalación del aislante Rubatex



### 2.4. Evaluación experimental

## 2.4.1. Pruebas preliminares

Es importante realizar pruebas preliminares para evaluar el desempeño del sistema y verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos y recomendados de refrigeración antes de poner en marcha el sistema con la torre de absorción. Para estas pruebas, se consideró medir el tiempo de enfriamiento del agua en dos volúmenes diferentes: 60 litros, como caso inicial, y 200 litros, que es el volumen necesario para operar la columna de absorción.

Las pruebas se realizaron en dos etapas:

### Prueba sin aislamiento térmico

En esta etapa, el tanque de agua no contaba con aislamiento térmico, lo que permitió evaluar las pérdidas de calor hacia el ambiente y determinar el impacto en la eficiencia del sistema.

#### Prueba con aislamiento térmico

Las mismas pruebas se repitieron con el tanque aislado para observar la reducción en las pérdidas de calor y su efecto en el tiempo de refrigeración.

Figura 8

Prueba con tanque aislado



### 2.4.2. Medición de la eficiencia de absorción

Después de comprobar el correcto funcionamiento del chiller, se procedió a realizar las pruebas en conjunto con la columna empacada. Para ello, se siguió el procedimiento de la práctica de absorción para medir el porcentaje de absorción de CO<sub>2</sub>. Aquello se realizó tanto con agua ambiente como con el agua fría para luego comparar resultados.

#### **Procedimiento**

- 1. Se inició el cronómetro para el muestreo.
- 2. Se tomaron muestras cada 5 minutos, durante 25 minutos.
- 3. Se midió el pH con el potenciómetro y se realizó la titulación respectiva de cada muestra, con HCl y anaranjado de metilo.
- 4. Se registraron datos hasta obtener la estabilidad de la columna.

#### Asunciones

- o Los cálculos se basaron en un sistema de absorción diluido.
- Se consideró a la mezcla de aire y CO<sub>2</sub> como gas ideal y que sus volúmenes son aditivos.
- Al ser un sistema diluido, se asumió que la concentración total a la salida fue de agua pura, por lo que solo se necesitó su densidad y peso molecular para hallar dicha concentración.
- o Se asumió que el solvente líquido entra sin ningún porcentaje de CO<sub>2</sub>.
- Con el valor de alcalinidad del agua que sale en cada variación se determinó la concentración y porcentaje de CO<sub>2</sub> a la salida del proceso.

#### **Ecuaciones utilizadas**

- Concentración

$$C = \frac{\rho}{M}$$
 Eq. 2.26

- Fracción másica

$$\% \frac{m}{m} = \frac{masa\ compuesto}{masa\ mezcla}$$
 Eq. 2.27

- Fracción molar

$$\%mol = \frac{mol\ compuesto}{mol\ mezcla}$$
 Eq. 2.28

- Ecuación de los gases ideales

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$
 Eq. 2.29

- Caudal

$$Q = \frac{\pi D^2 V}{4}$$
 Eq. 2.30

Potencial de hidrógeno

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$
 Eq. 2.31

Alcalinidad

$$A = \frac{N_{acido}V_{acido} \times 50000}{V_{muestra}}$$
 Eq. 2.32

Balance de materia en sistemas diluidos

$$G_m(y_1 - y_2) = L_m(x_1 - x_2)$$
 Eq. 2.33

- Porcentaje de CO<sub>2</sub> absorbido

$$%CO_{2abs} = \frac{moles\ CO_{2}\ a\ la\ salida\ del\ l\'iquido}{moles\ CO_{2}\ a\ la\ entrada\ del\ gas} \times 100\%$$
 Eq. 2.34

### Algoritmo

- a. Se calculó el caudal de aire de entrada con la ecuación (Eq. 2.30).
- b. Se obtuvieron las fracciones másicas y molares con ayuda de las ecuaciones (Eq. 2.27), (Eq. 2.28) y (Eq. 2.29).
- c. Se halló el valor de alcalinidad con la ecuación (Eq. 2.32) en unidades de mg CaCO<sub>3</sub>/L, y con ello encontrar la concentración de CO<sub>2</sub> usando las relaciones de las

reacciones químicas, considerando que la concentración de H<sup>+</sup> se puede obtener con la ecuación (Eq. 2.31).

- d. Para encontrar la fracción de CO<sub>2</sub>, se dividió para la concentración total del líquido,
   esto se halló con la ecuación (Eq. 2.26).
- e. Se realizó el respectivo balance de materia para encontrar flujos y composición de CO<sub>2</sub> en el gas a la salida con ayuda de la ecuación (Eq. 2.33).
- f. Teniendo los flujos, se calculó el porcentaje de dióxido de carbono absorbido con la ecuación (Eq. 2.34).

#### Reacciones involucradas

1. 
$$CO_{2(a)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow H_2CO_{3(ac)}$$

$$K_{1} = \frac{\left[H_{2}CO_{3\,(ac)}\right]}{\left[CO_{2\,(g)}\right]\left[H_{2}O_{(l)}\right]} = \frac{\left[H_{2}CO_{3\,(ac)}\right]}{\left[CO_{2\,(g)}\right]} = 1.7 \times 10^{-3}$$

**2.** 
$$H_2CO_{3(ac)} \leftrightarrow H_{(ac)}^+ + HCO_{3(ac)}^-$$

$$K_2 = \frac{\left[HCO_{3(ac)}^-\right]\left[H_{(ac)}^+\right]}{\left[H_2CO_{3(ac)}\right]} = 2.5 \times 10^{-4} \frac{mol}{L}$$

3. 
$$HCO_{3(ac)}^{-} \leftrightarrow H_{(ac)}^{+} + CO_{3(ac)}^{2-}$$

$$K_3 = \frac{\left[CO_{3(ac)}^{2-}\right]\left[H_{(ac)}^{+}\right]}{\left[HCO_{3(ac)}^{-}\right]} = 4.69 \times 10^{-11} \frac{mol}{L}$$

#### 2.4.3. Cálculo de COP real

Para determinar la eficiencia del sistema en condiciones reales de operación se calculó el Coeficiente de Desempeño (COP). Este coeficiente se define como la relación entre el efecto útil producido (enfriamiento) y el trabajo suministrado al sistema (consumo energético del compresor). Matemáticamente, esto se traduce como:

$$COP_{real} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}}$$
 Eq. 2.35

Donde:

Q<sub>evap</sub> = Potencia térmica absorbida por el evaporador [kW]

W<sub>comp</sub> = Potencia eléctrica consumida por el compresor [kW]

La potencia térmica absorbida por el evaporador se calculó midiendo la variación de temperatura del agua que circula por el evaporador, así como el caudal volumétrico de esta. A su vez que, la potencia eléctrica consumida por el compresor se midió usando un amperímetro para conocer la corriente real, y luego multiplicando por el voltaje proporcionado por el equipo, de tal manera que:

$$\dot{W}_{comp} = i \cdot v$$
 Eq. 2.36

**Figura 9** *Medición de amperaje* 



# 2.5. Estimación de costos

Se debe dividir los costos en tres partes: fabricación, implementación y operación, puesto que cada punto debe tener su desglose apropiado para una compresión ordenada de las diferentes etapas del proyecto. El trabajo fue realizado en diferentes etapas con presupuestos e inversiones distintas entre sí adecuadas a lo necesario entre las partes.

### 2.1.1 Estimación de costos de fabricación

Una vez realizado los cálculos de diseño se conoció las dimensiones de los equipos para la elaboración del chiller. Se contactó a la empresa "Chillers Ecuador S.A.S." para el asesoramiento en la compra de los equipos y su respectiva instalación, proveyeron todas las partes necesarias para la fabricación, además por su expertiz de más de 25 años fabricando chillers asistieron con mano de obra dando un costo final ajustado al presupuesto dado por ASHRAE. Para el cálculo se tomó en cuenta los ítems utilizados para la fabricación y también de la mano de obra brindada por la empresa proveedora.

#### 2.1.2 Estimación de costos de implementación

Para la implementación se requirió materiales más sencillos, que adapten el equipo a los requerimientos de la columna en sus conexiones tanto de agua como eléctricas. También se vio la necesidad de aislar el tanque de agua de la columna para evitar el aumento de temperatura y tener un enfriamiento más eficaz. Una vez conocido todo el material requerido se realizó un listado y se suma para dar un total final de este.

### 2.1.3 Estimación de costos de operación

En este ámbito se debe considerar diferentes tipos de consumos que existen dentro del sistema. Como primer punto se tiene el agua, se tiene que considerar el precio del consumo de agua en la ciudad de Guayaquil en el año 2024 y además del volumen a utilizar. Por último, el equipo utiliza la energía eléctrica para su funcionamiento por lo que se tomó en cuenta la capacidad del equipo y el tiempo de operación que tendría durante la práctica. En este ámbito se debe tener en cuenta el costo de kW/hora en la ciudad de Guayaquil en el año 2024. Conociendo esto se multiplicó el precio por las horas de funcionamiento y se conoció el consumo final que luego fue sumado al consumo de agua para obtener un precio total de funcionamiento.

Capítulo 3

## 3. Resultados y Análisis

# 3.1 Diseño y dimensionamiento del chiller

### 3.1.1. Resultados del dimensionamiento

A continuación, se presenta un desglose de la carga térmica del sistema de refrigeración:

**Tabla 1** *Resultados de la carga térmica* 

Parámetro	Valor	Unidad	
Carga del producto	6482.715	W	
Carga de servicio	2593.086	W	
Factor de seguridad	907.58	W	
Carga total de	9983.38	<b>33</b> 7	
refrigeración	7703.38	W	

Los valores indican que la carga del producto representa la mayor proporción, lo cual es razonable ya que corresponde al calor extraído del agua para alcanzar las condiciones requeridas. En general, la carga térmica total calculada es de 9983.38 W, lo cual cumple con los requerimientos de la práctica de absorción.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades termodinámicas del refrigerante de diferentes puntos clave del ciclo.

Tabla 2
Propiedades del ciclo termodinámico del refrigerante

Estado	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg K)	Calidad de vapor "x"
C	-10	572.1	418		1
C'	10	572.1	437.7	1.903	
D	133.1	2726.1	536.6		
D'	89.65	2726.1	487.1	1.903	
A	45	2726.1	275.5		0
В	-10	572.1	275.5		0.3882

Se pueden observar etapas características de un ciclo de refrigeración, ya sean isoentrópicas o isoentálpicas; tal como el paso de C a D (compresor), en donde la entropía del refrigerante permanece constante, esto busca minimizar las pérdidas irreversibles para aumentar la eficiencia. En el paso de D' a A (dispositivo de expansión) también se experimenta un cambio isoentrópico, con una caída significativa de la presión y temperatura, asegura una correcta transformación del refrigerante hacia un estado donde pueda absorber calor en el evaporador. Estas variaciones en las propiedades demuestran que cada componente del ciclo está operando dentro de los parámetros esperados, permitiendo que el sistema cumpla su función de refrigeración.

En la tabla siguiente se presentan las capacidades principales los componentes del chiller.

**Tabla 3**Capacidad de los componentes del chiller

Compresor		
Trabajo real del compresor "wcomp"	98.9	kJ/kg
COP teórico	2	
Potencia necesaria del compresor " $\dot{W}_{comp}$ "	6.087	kW
Potencia del motor de compresor " $\dot{W}_{motor}$ "	6.764	kW
Evaporador		
Calor absorbido en el evaporador "q <sub>evap</sub> "	162.2	kJ/kg
Coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado interno "h <sub>i</sub> "	1364	$W/m^2 \cdot K$
Coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado externo "ho"	750	$W/m^2 \cdot K$
Coeficiente global de transferencia de calor "U"	484	$W/m^2 \cdot K$
Área de transferencia	0.874	$m^2$
Condensador		
Calor desprendido por el condensador "qcond"	261.1	kJ/kg
Potencia del condensador "Qcond"	16.07	kW

Estos parámetros permitieron analizar el trabajo que debe realizar el compresor, la transferencia de calor en el evaporado y condensador, así como la potencia requerida, asegurando un diseño que cumpla con las demandas térmicas y operativas necesarias antes de su construcción.

# 3.1.2. Componentes internos seleccionados

En este apartado se presentan las características de los componentes seleccionado para la construcción del chiller, basados en los resultados analizados de los cálculos previos.

El compresor elegido es un modelo hermético rotativo diseñado para trabajo continuo.

**Tabla 4**Características del compresor

Características								
Marca	Toshiba GMCC							
Potencia	1.8 HP							
Voltaje	220V							
Frecuencia	50 Hz							
Refrigerante	R410a, R22							

Figura 10

Compresor hermético rotativo



El evaporador es de tipo inmersión tubular, fabricado en cobre y acero inoxidable SS304, ideal para garantizar un intercambio térmico efectivo.

**Figura 11**Evaporador de inmersión tubular



El condensador es de tubo y aletas de aluminio y cobre, enfriado por aire forzado proveniente de un ventilador, lo que asegura una disipación adecuada del calor.

Figura 12

Condensador de aluminio y cobre



Finalmente, el dispositivo de expansión seleccionado es de tipo orificio número 0.57, se escogió por la cantidad de refrigerante requerido en el sistema.

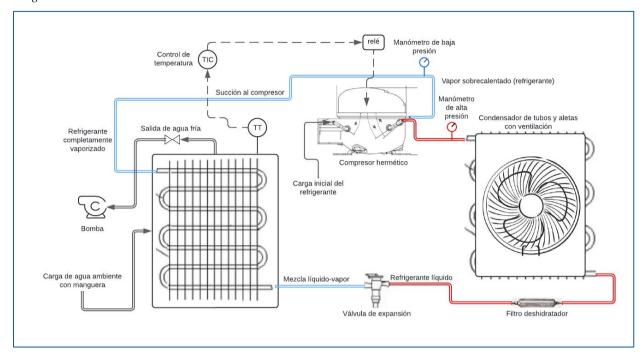
**Figura 13**Dispositivo de expansión



# 3.1.3. Vista final del equipo

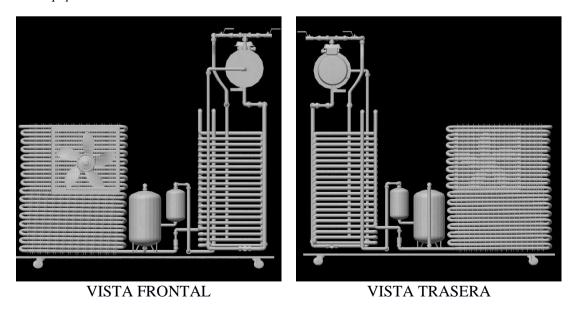
Como resultado del primer objetivo, se obtuvo inicialmente un diseño preliminar que detalla cómo deben conectarse los componentes principales del sistema para garantizar el cumplimiento del ciclo.

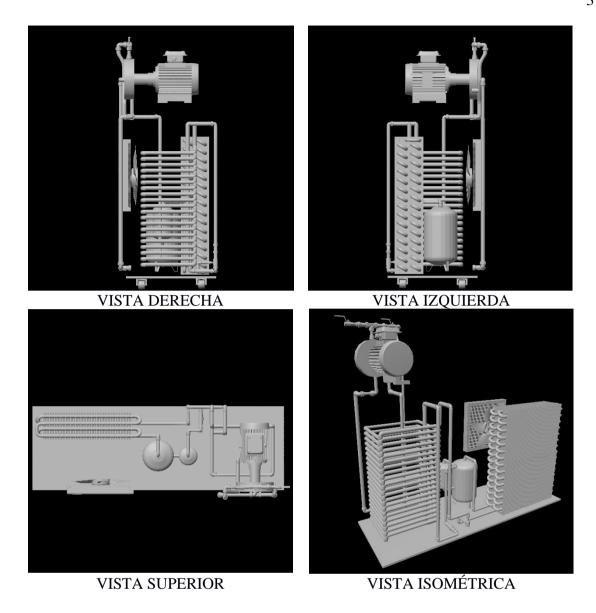
**Figura 14**Diagrama inicial del chiller



Posteriormente, se encuentra el diseño desarrollado más detallado en 3D que incluye vistas completas del chiller, lo cual permitió apreciar su configuración final con mayor claridad.

**Figura 15**Vistas del equipo en 3D





Este diseño sirvió para la construcción del equipo en colaboración con la empresa Chillers Ecuador experta en sistemas de refrigeración.

Figura 16

Ensamblaje del equipo



Figura 17

Chiller construido



Por último, se presenta el diagrama de flujo de la columna de absorción, mostrando la integración del chiller en el sistema para la alimentación del flujo líquido enfriado, destacando así su funcionalidad en la mejora del proceso de absorción.

Figura 18

Esquema del proceso de absorción con chiller implementado

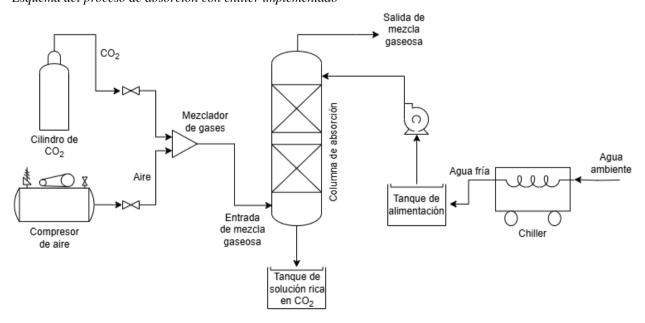


Figura 19

Chiller implementado a la columna de absorción



# 3.2. Coeficiente de rendimiento del chiller

En términos de electricidad, el chiller muestra una operación estable con corrientes de aproximadamente 13.4A en la Línea 1 y 12.5A en la Línea 2, lo que indica una diferencia de 1A, la cual es esperada dado que el sistema principal opera a 220V y sus componentes auxiliares a 110V.

**Tabla 5**Resultados de COP con pruebas de enfriamiento

Prueba	Volumen de agua (L)	Tiempo hasta alcanzar 5°C (min)	Corriente en Línea 1 (A)	Corriente en Línea 2 (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	СОР
1	60	25	13.42	12.49		2850.1	3.508
2	100	50	13.37	12.31		2824.8	3.54
3	100	55	13.48	12.56	220	2864.4	3.491
4	110	60	13.25	12.44		2825.9	3.538
5	200	80	13.5	12.59		2869.9	3.484
					COP p	romedio	3.5

Las pruebas realizadas muestran un COP promedio de 3.5, demostrando una muy estable eficiencia energética. En escala de clasificación de eficiencia energética, este rendimiento corresponde a Clase A, lo que significa que el equipo aprovecha de manera óptima la energía eléctrica consumida para producir frío invirtiendo un menor consumo eléctrico y costos operativos más bajos (iHousetop, 2013).

Los resultados describen una alta eficiencia del sistema independientemente del volumen de agua procesado (desde 60L hasta 200L). El rendimiento energético se mantiene constante a pesar de que el tiempo para alcanzar los 5°C aumenta con el volumen, confirmando el excelente desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

## 3.3. Resultados de pruebas de absorción

En esta sección se muestran los resultados relevantes de las pruebas realizadas con la columna de absorción, tanto con agua ambiente como con agua fría para su comparación. En el Apéndice B se encuentran los cálculos con mayor detalle.

**Tabla 6**Condiciones iniciales de las pruebas de absorción

	Fluio	Prueba con a	gua fría	Prueba con agua ambiente		
Compuesto	Flujo (LPM)	Temperatura	Densidad	Temperatura	Densidad	
		de entrada (°C)	(kg/L)	de entrada (°C)	(kg/L)	
Agua	10	9	0,99977	30	0,99571	
$CO_2$	3	27	0,00178	27	0,00177	
Aire	20,52	27	0,00117	27	0,00116	

Nota. Estas condiciones iniciales se mantuvieron durante todas las pruebas.

**Tabla 7**Resultados de pruebas de absorción a diferentes temperaturas

PRIMERA PRUEBA								
	P	rueba con ag	ua fría	Pru	eba con agua	ambiente		
Tiempo (min)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		

0	6,125	9,7	32,33	7,615	1,35	4,50
3	6,03	10,15	33,83	6,79	1,5	5,00
5	5,855	9,95	33,17	5,97	1,55	5,17
8	5,665	10,15	33,83	5,945	1,9	6,33
10	5,45	10,4	34,67	5,9	1,1	3,67
13	5,32	10,35	34,50	5,94	1,4	4,67

# SEGUNDA PRUEBA

	P	rueba con ag	ua fría	Prueba con agua ambiente			
Tiempo (min)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	
0	6,32	9,45	31,5	7,25	1,35	4,5	
3	6,04	11,4	38	6,535	1,4	4,67	
5	5,845	9,75	32,5	5,82	1,45	4,83	
8	5,645	10,25	34,17	5,58	1,6	5,33	
10	5,445	10,65	35,5	5,505	1,75	5,83	
12	5,295	10,8	36	5,465	1,65	5,5	

# TERCERA PRUEBA

	P	rueba con ag	ua fría	Prueba con agua ambiente				
Tiempo (min)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		
0	6,21	10	33,33	7,255	2,35	7,83		
3	6,005	10	33,33	6,08	1,9	6,33		
5	5,86	9,85	32,83	6,065	2,85	9,50		
8	5,56	10,1	33,67	6,035	3,25	10,83		
10	5,35	10,1	33,67	6,09	3,25	10,83		
12	5,265	9,35	31,17	5,935	3,1	10,33		

# CUARTA PRUEBA

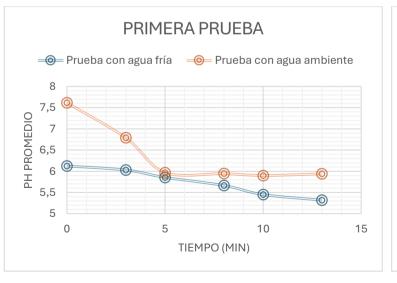
	P	rueba con ag	ua fría	Prueba con agua ambiente			
Tiempo (min)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	
0	6,26	9,95	33,17	7,325	2,55	8,50	
3	5,86	10,35	34,50	5,71	2,4	8,00	
5	5,675	10,05	33,50	5,685	3,25	10,83	
8	5,515	10,55	35,17	5,665	2,35	7,83	
10	5,395	10,15	33,83	5,575	2,55	8,50	
13	5,325	11,1	37,00	5,565	2,05	6,83	
			QUINTA PRU	EBA			

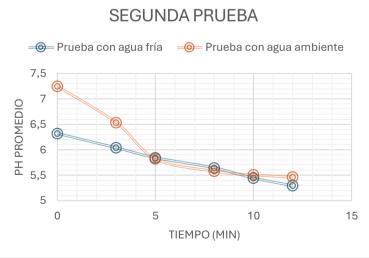
	P	rueba con ag	ua fría	Prueba con agua ambiente			
Tiempo (min)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	pH promedio	HCl consumido promedio (mL)	Alcalinidad promedio (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	
0	6,18	10,05	33,50	7,615	0,745	2,48	
3	6	10,35	34,50	5,97	1,7	5,67	
5	5,79	9,9	33,00	5,94	1,95	6,50	
8	5,565	10,3	34,33	5,89	1,6	5,33	
10	5,4	10,25	34,17	5,815	1,8	6,00	
12	5,245	9,4	31,33	5,61	2,25	7,50	

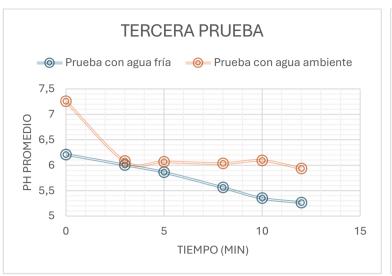
En las cinco pruebas realizadas a diferentes temperaturas (9 y 30°C), se alcanza a ver una notable diferencia en la absorción de CO<sub>2</sub>. Los patrones de comportamiento indican que el pH del agua a la salida del proceso es cada vez más bajo si se opera con agua fría. Además, se puede apreciar que el consumo de HCl durante la titulación con agua ambiente es mucho menor que con el agua fría; esto hace elevar las cantidades de alcalinidad, haciendo notar que hay más presencia de CO<sub>2</sub> generado.

Los resultados de estos valores se reflejan mejor en las gráficas a continuación:

**Figura 20**Gráficos de pH vs. tiempo









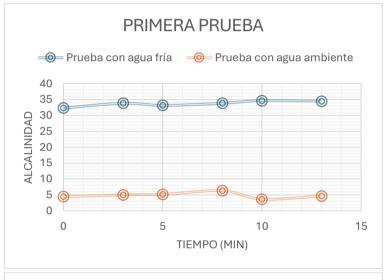


La tendencia de las gráficas de pH vs. Tiempo es consistente tanto con la muestra de agua fría como con la muestra con agua ambiente. Se puede observar que, con agua fría, el pH inicia con valores alrededor de 6.2, el cual es menor que los primeros valores de pH en las pruebas con agua ambiente (7.4-7.6). Esto se debe claramente a que el agua fría tiene mayor capacidad de retener CO<sub>2</sub> disuelto, lo que resulta en la formación de ácido carbónico, reduciendo el pH inicial. Luego, en ambos casos, el pH sigue disminuyendo a lo largo del tiempo, indicando que el agua atrapa cada vez más dióxido de carbono. Sin embargo, es notable destacar que los valores de pH con agua fría tienen una disminución más pronunciada en comparación a las pruebas con agua ambiente. Con estos primeros resultados ya se puede inferir una mejora en la absorción de CO<sub>2</sub>.

Una limitación importante fue la del volumen de agua utilizado para las pruebas. Como se observó en la Tabla 5, el tiempo de enfriamiento aumenta cuando el volumen de agua es cada vez mayor, por lo cual no se pudo usar los 250 litros de agua que son correspondientes a una práctica completa de absorción en la columna del laboratorio. Esto hizo que los tiempos de prueba fueran menores a 15 minutos. Si la columna seguía operando por más tiempo, se hubiera observado con mejor claridad cómo los valores de pH de agua ambiente se mantenían en el rango de 5.9-5.6, mientras que con el agua fría hubieran seguido descendiendo.

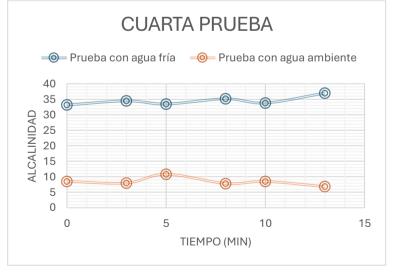
Figura 21

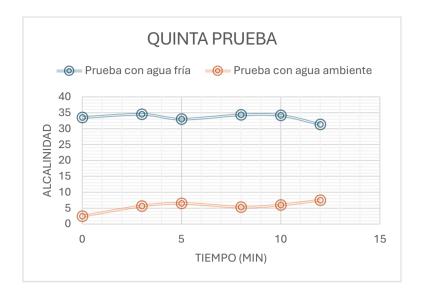
Gráficos de Alcalinidad vs. tiempo





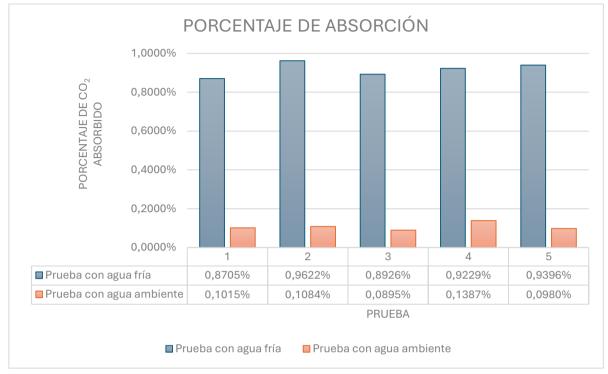






Por otro lado, se puede apreciar una marcada diferencia entre ambas condiciones de temperatura en cuanto a los valores de alcalinidad. Con el agua a temperatura ambiente, los valores de alcalinidad se mantienen entre 5-10 mgCaCO<sub>3</sub>/L, lo que es significativamente más bajo que la alcalinidad en las muestras de agua fría (30-35 mgCaCO<sub>3</sub>/L). Esto se conecta con la teoría de que, a bajas temperaturas, la solubilidad de CO2 en agua aumenta, lo que permite una mayor formación de especie carbonatadas que contribuyen a la alcalinidad total del sistema. Otra limitante que se tuvo al momento de realizar las pruebas a temperatura ambiente fue que los restos del agua más acidificada se mezclaban con el agua fresca, puesto a que esta práctica se la hacía después de la prueba con agua fría; causando que en algunas ocasiones hayan valores distintos a los esperados, como es el caso de las pruebas 3 y 4, que muestran una alcalinidad de 10 mgCaCO<sub>3</sub>/L, debido a un mayor consumo de HCl en las titulaciones.





Finalmente, con respecto al porcentaje de CO2 capturado, se marca una gran diferencia en la gráfica. El agua fría alcanza un porcentaje promedio de 0.92%, mientras que el agua ambiente solo logra un promedio de 0.1%. Esto también se alinea a la teoría de solubilidad de gases en líquidos, lo cual hace que el proceso de absorción con agua a baja temperatura sea capaz de captar una mayor cantidad de CO2. Cabe recalcar, que los resultados con la mejora realizada alcanzan valores deseables tomando en consideración las literaturas que usan columnas de absorción a escala piloto para la retención de dióxido de carbono, las cuales mencionan que el porcentaje de absorción está alrededor de 1.2%, esto valida la efectividad de la propuesta del proyecto y sugiere que se están alcanzando eficiencias comparables a sistemas más grandes (Sjöstrand & Yazdi, 2009).

# 3.4. Costos estimados

En la Tabla 8 se presentan los costos asociados al proyecto, incluyendo los gastos de materiales, instrumentación y equipos necesarios para la construcción y operación del sistema de absorción de CO<sub>2</sub>. El costo total del proyecto asciende a \$1530.36, siendo los componentes principales del sistema los que representan el mayor porcentaje de la inversión.

Tabla 8

Costos estimados del provecto

Parámetro	Item	Cantidad	Precio unitario	Valor
Costos de fabricación	Equipo de refrigeración	1	\$ 1.460,00	\$ 1.460,00
Costos de	Aislante	$2 \text{ m}^2$	\$ 7,00	\$ 14,00
	Enchufe tipo chino	1	\$ 3,74	\$ 3,74
	Manguera plástica	6 m	\$ 2,64	\$ 15,84
	Cemento de contacto	2	\$ 3,53	\$ 7,06
mplementación	Válvula esférica 1/2"	1	\$ 3,73	\$ 3,73
	Componentes pequeños (neplos, reductores, abrazaderas,			\$
	acoples)			23,21
	Cinta teflón	2	\$ 0,29	\$ 0,58
Costos de – operación –	Consumo de agua			
	5 pruebas de enfriamiento a diferentes volúmenes	570 L	\$0,23/m3	\$ 0,13
	10 pruebas de absorción	1400 L	\$0,23/m3	\$ 0,32
	Consumo de electricidad			
	5 pruebas de enfriamiento a	12,819	\$0,092/kWh	\$ 1,18
	diferentes volúmenes	kWh		
	10 pruebas de absorción	6,1685 kWh	\$0,092/kWh	\$ 0,57
_	COSTO TOTAL			\$1.530,3

Capítulo 4

### 4. Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1. Conclusiones

Luego de la implementación y evaluación completa del sistema de refrigeración en la columna de absorción de CO<sub>2</sub>, se llegaron a las siguientes conclusiones respecto a los objetivos planteados inicialmente:

- 1. La selección e integración de los componentes principales del sistema fue crucial para obtener resultados valiosos en las pruebas realizadas: el compresor hermético rotativo proporcionó la compresión estable necesaria, el evaporador de inmersión tubular facilitó una transferencia térmica eficiente y el condensador de aluminio y cobre aseguró una disipación de calor adecuada. Esto dio lugar a un sistema robusto que cumple con los requerimientos funcionales del diseño propuesto. Además, el diseño y dimensionamiento del sistema resultaron ser altamente efectivos, alcanzando una carga térmica de 9983.38W.
- 2. En términos de eficiencia energética, el chiller demostró una excelente consistencia y versatilidad en un amplio rango de volúmenes operativos, alcanzando un COP promedio de 3.5, lo que lo sitúa en la clasificación de eficiencia energética Clase A. La consistencia del sistema se reflejó en valores estables de corriente, con aproximadamente 13.4A en Línea 1 y 12.5A en Línea 2, lo que confirma una operación energética sostenible a largo plazo.
- 3. El sistema de refrigeración ha demostrado una mejora sustancial en la eficiencia del proceso de absorción de CO2, como lo revelan las pruebas realizadas, que evidencian un aumento notable en la capacidad de absorción. Por ejemplo, con agua fría a 9°C, los porcentajes de absorción oscilaron entre 0.87% y 0.96%, en marcado contraste con el rango de 0.08% a 0.14% observado a temperatura ambiente (30°C). Estos valores mejorados se acercan a los valores de referencia en la literatura (1.2%) para

sistemas similares, lo que resulta significativo para aplicaciones industriales concretas.

#### 4.2 Recomendaciones

Para la continuidad y mejora del proyecto, se presentan las siguientes recomendaciones estratégicas para ser aprovechadas en un futuro:

- 1. Para el tanque de la columna de absorción se recomienda incorporar un intercambiador de calor que vaya sumergido en el suministro de agua, lo que permite que exista un enfriamiento de agua continuo sin inconvenientes. Debido a que actualmente se utiliza la bomba de la columna y del chiller para enfriar el agua. El caudal del ambas no es igual lo que causa que se rebose, provocando que el proceso de refrigeración se detenga, además que moja el área circundante.
- 2. Implementar un intercambiador de calor previo al ingreso del agua a la columna de absorción. Esto permitiría enfriar solamente el volumen necesario para la operación reduciendo el tiempo de enfriamiento considerablemente. La idea fue considerada y puesta en marcha, pero al no alcanzar temperaturas menores a 10 °C se la descarto. Pero dentro de la línea de agua de la columna de absorción se coloco dos llaves para realizar un bypass el cual permitiría la instalación en un futuro.
- 3. En caso de llevarse a cabo la propuesta de incorporar un intercambiador de calor, se recomienda utilizar glicol como el refrigerante que pasa a través del chiller, puesto que es un liquido que puede alcanzar temperaturas menores a los 0 °C, permitiendo alcanzar menores temperaturas en el sistema.
- 4. Se recomienda la utilización de algún químico que detenga y limpie la corrosión en el interior de la carcasa donde se encuentra el serpentín, puesto que actualmente ensucia el líquido dentro del sistema, lo que provoca que se dedique

- tiempo a expulsar líquido sucio del sistema, reduciendo de esta manera la operatividad.
- 5. Adicionar una salida independiente de líquido en el visor de nivel, puesto que actualmente se encuentra compartiendo tubería con a la succión de agua lo que provoca que una vez se enciende la bomba el visor de mediciones erróneas. Lo que provoca que solo funcione al momento de llenado del chiller, previo a su encendido.

#### Referencias

Almendariz Llanos, G. R., & Lara Gavilanes, D. I. (2014). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN CHILLER PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. [Tesis de grado Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Obtenido de http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3525

Cachago Lluglluna, M. G. (2020). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DIDÁCTICO PARA ENFRIAMIENTO DE AGUA (CHILLER)*. [Tesis de grado Escuela Politécnica Nacional]. Obtenido de http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21088

Carreño Barrera, P. F., & Jadán Lucero, C. M. (2013). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DEL REFRIGERANTE R134a MODIFICANDO SU COMPOSICIÓN QUÍMICA*. [Tesis de grado Universidad Politénica Salesiana]. Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4803/1/UPS-CT002646.pdf

Carroll, J. J., Slupsky, J. D., & Mather, A. E. (1991). *The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure*. Obtenido de Journal of Physical Chemistry A (Vol. 20, No. 6, pp. 1201-1209). https://doi.org/10.1063/1.555900

Cengel, L. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa, Cuarta Edición*. McGraw-Hill.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica, Octava Edición*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Conforempresarial. (7 de Abril de 2020). *Partes de un Chiller*. Obtenido de https://www.conforempresarial.com/partes-de-un-chiller/

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP. (5 de septiembre de 2014). Vigente el mecanismo para subsidio eléctrico. Obtenido de https://www.celec.gob.ec/termopichincha/noticias/vigente-el-mecanismo-para-subsidio-

electrico/#:~:text=La%20tarifa%20promedio%20a%20nivel,9%2C20%20cUSD%2FkWh.

Diamond, L. W., & Akinfiev, N. N. (2003). *Solubility of CO2 in water from -1.5 to 100°C and from 0.1 to 100 MPa: Evaluation of literature data and thermodynamic modelling*. Obtenido de Fluid Phase Equilibria (Vol. 208, Issues 1–2, pp. 265–290). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0378-3812(03)00041-4

EMBRACO. (2021). *Cómo seleccionar el compresor ideal*. Obtenido de https://www.embraco.com/blog/es-es/seleccionar-compresor-ideal/

Franchini, G., Notarbartolo, E., Padovan, L. E., & Perdichizzi, A. (2015). *Modeling, design and construction of a micro-scale absorption chiller*. Energy Procedia, 82, 577–583. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.874

Franco Lijó, J. M. (2012). *Manual de Refrigeración*. Barcelona: Reverté. S.A. Obtenido de https://www.escuelafluvial.edu.ar/files/Manual-de-Refrigeracion-de-Lijo-Completo.pdf

García Suárez, F. M., & Reyes Vera, K. E. (2015). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA COLUMNA EMPACADA DE ABSORCIÓN DE GASES PARA LA MEZCLA BINARIA AIRE-CO2 EMPLEANDO COMO SOLVENTE UNA SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO*. [Tesis de grado Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Obtenido de http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/38207

Gas servei, S.A. (8 de Junio de 2020). *Ficha técnica R-410A-Gas Servei*. Obtenido de https://gas-servei.com/wp-content/uploads/2024/02/ficha-tecnica-r-410a-gas-servei.pdf

iHousetop. (2013). ¿Cuál es la clase de eficiencia energética de un sistema dividido? Obtenido de https://ihousetop.decorexpro.com/es/kondicionirovanie/instrukcii/chto-takoe-klass-energopotrebleniya-split-sistemy/

Momin, G., Jadhav, V., Gawade, A., & Chaskar, R. (2016). *Design and Manufacturing of Chilled Water System for Process Cooling Application*. In IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering | (Vol. 2, Issue 11).

Rani, M. F. H., Razlan, Z. M., Shahriman, A. B., Yong, C. K., Harun, A., Hashim, M. S. M., Faizi, M. K., Ibrahim, I., Kamarrudin, N. S., Saad, M. A. M., Zunaidi, I., Wan, W. K., & Desa, H. (2017). Design of refrigeration system using refrigerant R134a for macro compartment. Journal of Physics: Conference Series, 908(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012054

Sjöstrand, F., & Yazdi, R. (2009). *Absorption of CO 2-by Ammonia*. [Tesis de grado Växjö University] Obtenido de https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:222026/FULLTEXT01.pdf

Ortolá, M. D., Tomas Egea, J. Á., Fito Soñer, P., & Castro Giráldez, M. (2018). *Evaporadores en un circuito de refrigeración mecánica*. Universitat Politécnica de Valencia. Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/104056/Ortol%C3%A1;Fito;Castro%20-%20Evaporadores%20en%20un%20circuito%20de%20refrigeraci%C3%B3n%20mec%C3%A1 nica.pdf?isAllowed=y&sequence=1

Valencia, I. (2019). *Ley de Solubilidad de Henry*. Obtenido de https://repositorio-uapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2886/mod\_resource/content/1/UAPA-Ley-Solubilidad-Henry/index.html

Wankat, P. C. (2012). Separation process engineering: includes mass transfer análisis, Third Edition. Pearson Education, Inc.

Weather Spark. (2024). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guayaquil*. Obtenido de https://es.weatherspark.com/y/19346/Clima-promedio-en-Guayaquil-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o

## Apéndice A Manuales, guías y fichas técnicas



## Manual de usuario

## CHILLER



Capacidad: 2 TON REF.

REFRIGERACION USO DOMESTICO

Marca: Chillers Ecuador



# ÍNDICE

1

### **NOMENCLATURA DEL EQUIPO**

Nomenclatura empleada para el modelo del equipo.

2

### **ESQUEMA DE REFRIGERACION**

Diagrama que muestra cómo funciona el sistema de refrigeración del chiller.

3

## **CARACTERISTICAS TECNICAS**

Capacidades y características técnicas del equipo.

4

### **ELEMENTOS DEL EQUIPO**

Muestra las partes y componentes del chiller.

5

#### **OPERACION DEL EQUIPO**

Operación del chiller y qué se espera de su uso.

6

### **INDICACIONES FINALES**

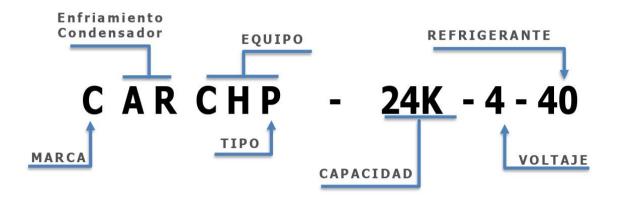
Recomendaciones finales para el uso y mantenimiento adecuado del chiller.

7

## **ACERCA DE NOSOTROS**

Información de la empresa, números de contacto y direcciones para un mejor asesoramiento.

## **NOMENCLATURA DEL EQUIPO**



Enfriamiento Condensador   AR - Air Refrigerated   WR - Water refrigerated	Marca	Chillers Ecuador Chillers Ecuador
CH - Chiller     ENF - Enfriador de Aire     CTA - Torre Enfriamiento     A - Abierto     M - Modular     P - Portátil     C - Compacto     Capacidad     Voltaje     Voltaje     Capacidad     Capa		
CTA - Torre Enfriamiento   A - Abierto   M - Modular   P - Portátil   C - Compacto		CH - Chiller
Tipo  M - Modular P - Portátil C - Compacto  24K - 24000 BTU/h  1. 230 VAC - 3 pH - 60 Hz 2. 460 VAC - 3 pH - 60 Hz 3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz 4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A 20 R-22 30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O		
P - Portátil   C - Compacto		
C - Compacto  24K - 24000 BTU/h  1. 230 VAC - 3 pH - 60 Hz  2. 460 VAC - 3 pH - 60 Hz  3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz  4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A  20 R-22  30 R-407C  40 R-410A  50 R-417A  60 H2O	Tino	
Capacidad       24K - 24000 BTU/h         1. 230 VAC - 3 pH - 60 Hz         2. 460 VAC - 3 pH - 60 Hz         3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz         4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz         10 R-134A         20 R-22         30 R-407C         40 R-410A         50 R-417A         60 H2O		60/ / A 600 (600 (600)
Voltaje  1. 230 VAC - 3 pH - 60 Hz 2. 460 VAC - 3 pH - 60 Hz 3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz 4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz 4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A 20 R-22 30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O	C	
Voltaje  2. 460 VAC - 3 pH - 60 Hz 3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz 4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A 20 R-22 30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O	Сарасідад	
3. 115 VAC - 1 pH - 60 Hz 4. 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A 20 R-22 30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O		
## 230 VAC - 1 pH - 60 Hz  10 R-134A  20 R-22  30 R-407C  40 R-410A  50 R-417A  60 H2O	Voltaje	
Refrigerante  10 R-134A 20 R-22 30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O		
Refrigerante  30 R-407C 40 R-410A 50 R-417A 60 H2O		
Refrigerante         40 R-410A           50 R-417A           60 H2O		<b>20</b> R-22
<b>Refrigerante 50</b> R-417A <b>60</b> H2O		<b>30</b> R-407C
60 H2O	Refrigerante	
170 R-404A		
80 R-507A		<b>70</b> R-404A <b>80</b> R-507Δ

Chillers Ecuador  COLD PLUNGE CHILLER  MODEL: CARCHP-24K-4-40 SERIAL: CHE-06-2024-002	
COOLING CAPACITY	2 TR
TYPE PORTATIL	
VOLTS	220
HERTZ 60	
PHASE	1
COMP MAX AMPS.	9,62
WATERPUMP	4,5
VENT AMPS NOM.	0,7
AMPS TOTAL	14,8
REFRIGERANT	R-410A
REFRIGERANT CHARGE	1100 g
REFRIGERANT OIL	Mineral
WATER FLOW	12 GPM
WEIGHT LBS	96 lbs
WATER INLET	1/2"
WATER OUTLET	1/2"
MANUFACTURED DATE 06/2024	
MADE IN ECUADOR	

## **ESQUEMA DE REFRIGERACION**

El Equipo Chiller tiene la función de enfriar agua en bajo grado de dureza en las instalaciones de procesos domésticos recreativos. Cuenta con una capacidad de 2 Ton. de refrigeración, manejado por **UN SOLO COMPRESOR** de tipo hermético para baja temperatura para trabajo continuo.

Su funcionamiento es en un circuito cerrado presurizado a 60 PSI máx. con la recirculación del líquido (agua), el equipo está concebido para suministrar agua helada entre un rango de 20 a 6°C Grados Celsius.

Esta versión de Chiller es de tipo portátil enfriado por aire, con evaporador de tipo tubular, en un solo circuito de refrigeración y un circuito de aqua de recirculación.

Todo el sistema de controles está diseñado para accionar las partes de funcionamiento con grado industrial y proteger en un 50% el equipo ante una falla.

El refrigerante por utilizarse en este Chiller es **R-410A**, que está dentro del grupo de los gases amigables con el medio ambiente.

## Gráfico de Esquema de Refrigeración



## **CARACTERISTICAS TECNICAS**

Esta es una unidad de enfriamiento de agua de Expansión Directa, Tipo Portátil, Enfriado por Aire, para uso Industrial.

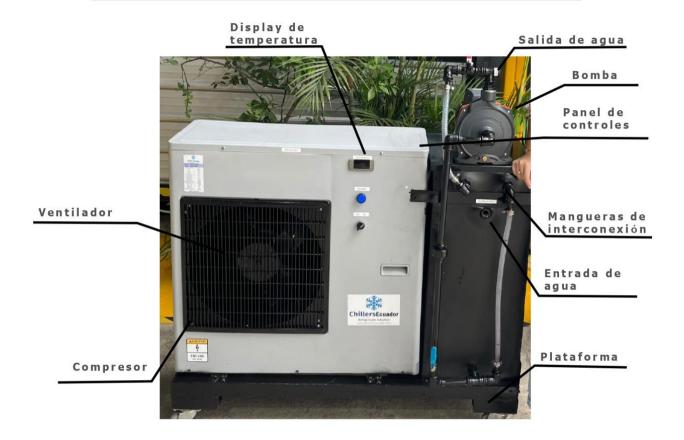
La introducción del nuevo Chiller "CAR", enfriado por aire a la línea de Chillers de nuestra fabricación, evidencia la continua Investigación y Desarrollo de nuestros productos en el ámbito de las diferentes actividades de nuestros clientes, ofreciendo calidad, confiabilidad y eficiencia en el Sector Industrial, Marino y Comercial, de nuestro país.

Este diseño cuenta con seguridades y calidad de sus partes y piezas que generan eficiencia en su funcionamiento y ahorro de energía por el uso de motores eficientes, para suplir frio en uso doméstico, sin temor a paralizaciones innecesarias.

En términos generales esta unidad está fabricada bajo las siguientes características técnicas tanto, en su diseño como en su construcción:

- Base y paneles de acero galvanizado con tratamiento epóxico contra oxidación.
- Compresor hermético rotativo para trabajo continuo marca Toshiba GMCC de 1.8 HP
- Evaporador de tipo inmersión tubular de cobre y SS304.
- Condensador enfriado por aire.
- Sistema precargado y precableado para fácil uso y conexión.
- Caja eléctrica sellada para protección de elementos de control ante el ambiente
- Sistema de controles equipado con tecnología de control industrial para mayor eficiencia y control.
- Controlador de temperatura Dixell.
- Dispositivo de expansión tipo orificio núm. 0.57.

## **ELEMENTOS DEL EQUIPO**



## **OPERACION DEL EQUIPO**

#### **IMPORTANTE**



#### ANTES DE ENCENDER EL CHILLER, VERIFICAR:

Nivel de agua de recirculación en el tanque reservorio. Debe llenarse las tuberías o mangueras de agua helada y el tanque reservorio con agua fresca.

Eliminar cualquier obstrucción que impida el paso libre del aire por los serpentines del condensador

Verificar el correcto conexionado SECUENCIA ELECTRICA del aterrizado y neutro al chiller.



Asegurar la apertura de las llaves de paso de agua helada del equipo

Verificar la apertura de la válvula reguladora de succión de la bomba de recirculación

Asegurar la inexistencia de fugas de gas o agua de recirculación en el equipo chiller.

Verificar el cierre de la válvula de drenaje de agua (Tina)



La falta de observación de esta recomendación generará la rotura del evaporador y severos daños al equipo.

## **CONFIGURACION Y ENCENDIDO DE CHILLER**

El equipo cuenta con un controlador de temperatura digital el cual nos permite realizar el ciclo de encendido y apagado por temperatura, seteo de temperatura, entre otros.

Previo al encendido, se deberá verificar el correcto cebado de la bomba de recirculación de agua, presencia de agua en el tanque intercambiador y correcto aterrizado del equipo.

Una vez se haya verificado tales condiciones, se procede al encendido del equipo mediante el accionamiento del switch en la parte frontal del equipo. Una vez realizada tal acción se encenderá la bomba y posteriormente el ventilador con el compresor. Recordar que siempre deberá haber primero flujo de agua en el equipo antes de refrigeración.

Cada cable se encuentra marcado para la conexión de los 220VAC 1PH. En la salida de agua del equipo se encuentra una llave bypass, para que, en caso de existir mucha presión en el sistema, se hace la apertura y se deriva el agua a presión en menor cantidad para evitar problemas en la maquina de proceso a enfriar. En la parte inferior cuenta con una llave de cierre y apertura de agua en caso de no usar equipo para facilitar el cebado del mismo.

La ubicación del equipo deberá ser en un lugar exterior o con existencia de aire fresco y defogue del aire del condensador a un lugar exterior para evitar el recalentamiento del chiller. La distancia mínima de instalación es de aproximadamente 1.5m hacia cada lado, teniendo siempre en cuenta evitar el contacto con agua y polvo que pueda caer sobre el equipo. Usar siempre etylene glicol para evitar la congelación del equipo.

## Configuraciones en controlador DIXELL

Siempre el diferencial de temperatura deberá ser entre 2 a 3 grados, es decir si se desea setear el equipo para que apague a 14 grados, deberá poner para que encienda en 16 grados (2 grados centígrados de diferencia) y siempre deberá ser que la temperatura más baja apague y la más alta encienda. Poner atención en aquello al momento de configurar el equipo.

El control mode deberá siempre permanecer en "temperature" y "enable" activado.

Una vez establecidos los parámetros se deberán guardar los cambios en la parte inferior "save changes" y automáticamente será direccionado a la pestaña de "auto".



https://media.nisbets.com/asset/au/media/user%20manual%20ad728.pdf

## **INDICACIONES FINALES**

- Se tiene que realizar el mantenimiento del equipo en un intervalo de 4 a 6 meses, el cual varía según el uso que le otorgue el usuario.
- Limpiar regularmente el condensador y evaporador para mantener una transferencia de calor eficiente. Utiliza métodos y productos de limpieza recomendados por el fabricante para evitar daños en los componentes.
- Monitorea y ajusta el flujo de agua en el chiller para garantizar un rendimiento óptimo y prevenir la acumulación de incrustaciones. Verifica que los niveles de agua sean los adecuados y que no haya obstrucciones en las tuberías. Verificar que no exista aire en las tuberías y de ser el caso, proceder con el cebado. Bajo ninguna condición el flujo del agua deberá ser mínimo. La llave de agua de la bomba deberá siempre estar abierta en un 100% durante el funcionamiento del equipo.
- Porcentaje de Glicol por usar es siempre del 5% en adelante. Temperatura mínima a setear que llega el equipo es de 5 grados.

GLICOL DE ETILENO		
% DE GLICOL	% AGUA	°C
0	100	0
5	95	-1.1
10	90	-2.2
15	85	-3.9
20	80	-6.7
25	75	-8.9
30	70	-12.8
35	65	-16.6
40	60	-20.6
45	55	-26.7
50	50	-33.3

GLICOL	DE PROPILE	NO
% DE GLICOL	% AGUA	°C
0	100	0
5	95	
10	90	-3
15	85	
20	80	-8
25	75	
30	70	-14
35	65	
40	60	-22
45	55	
50	50	-34

## **ACERCA DE NOSOTROS**

Cualquier consulta estamos a las órdenes.



## CHILLERS ECUADOR SAS

## **Nuestros Equipos:**

Los Equipos de nuestra Marca: **CHILLERS ECUADOR**, diseñados y fabricados por nuestra empresa cuentan con Respaldo y Servicio Técnico personalizado, con Técnicos altamente capacitados.

Estamos a las órdenes para atender todos sus requerimientos.

#### **Ubicación de Oficinas:**

Ciudad: Guayaquil – Ecuador

Dirección: Mapasingue Este - Guayaquil

Teléfonos: +593-988992997

E-Mail: gerencia@chillersecuador.com

Ventas: +593-990566531

ventas@chillersecuador.com



### DIGITAL CONTROLLER XR02CX

1	General warnings	1
2	General description	1
3	Regulation	1
4	Defrost	1
5	Front panel commands	1
6	Parameters	1
7	Installation and mounting	2
8	Electrical connections	2
9	How to use the hot key	2
10	Alarm signalling	2
11	Technical data	2
12	Connections	2
13	Default setting values	2

#### 1 GENERAL WARNINGS

#### 1.1 PLEASE READ BEFORE USING THIS MANUAL

- This manual is part of the product and should be kept near the instrument for easy and quick
- reference.

  The instrument shall not be used for purposes different from those described hereunder. It cannot be
- Check the application limits before proceeding.

#### 1.2 SAFETY PRECAUTIONS

- Check the supply voltage is correct before connecting the instrument.

  Do not expose to water or moisture: use the controller only within the operating limits avoiding sudden temperature changes with high almospheric humidity to prevent flormation of condensation Warning: disconnect all electrical connections before any kind of maintenance.

  Fit the probe where it is not accessible by the End User. The instrument must not be opened.

- In case of failure or faulty operation send the instrument back to the distributor or to "Dixell S.r.I." (see address) with a detailed description of the fault.
- acoress) with a detailed description of the fault.

  Consider the maximum current which can be applied to each relay (see Technical Data).

  Ensure that the wires for probes, loads and the power supply are separated and far enough from each other, without crossing or intertwining.

  In case of applications in industrial environments, the use of mains filters (our mod. FT1) in parallel
- with inductive loads could be useful.

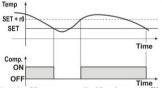
#### GENERAL DESCRIPTION

Model XR02CX, format 32 x 74 x 50 mm, is a digital thermostat, with off cycle defrost, designed for refrigeration applications at normal temperature. It provides a relay output to drive the compressor. It is also provided with 2 NTC probe input. The instrument is fully configurable through special parameters that can be easily programmed through the keyboard or the by HOT-KEY.

#### REGULATION

#### 3.1 THE REGULATION OUTPUT

The regulation is performed according to the temperature measured by the thermostal probe with a positive differential from the set point if the temperature increases and reaches set point plus differential the compressor is started and differential the compressor is started and differential the compressor is started and then turned off when the temperature reaches the set point value again.



In case of fault in the thermostat probe the start and stop of the compressor are timed through parameters CY and Cn.

#### 4 DEFROST

Defrost is performed through a simple stop of the compressor. Parameter **id** controls the interval between defrost cycles, while its length is controlled by parameter **Md**.

#### FRONT PANEL COMMANDS



SET	To display target set point, in programming mode it selects a parameter or confirm an operation
**	(DEF) To start a manual defrost
A	(UP) In programming mode it browses the parameter codes or increases the displayed value
<b>Y</b> AUX	(DOWN) In programming mode it browses the parameter codes or decreases the displayed value

KEYS COMBINATION	l .	
V+A	To lock or unlock the keyboard	
SET+♥	To enter in programming mode	
SET+	To return to room temperature display	

LED	MODO	SIGNIFICATO
xtx	On	Compressore enabled
*	Flashing	Anti short cycle delay enabled (AC parameter)
*	On	Defrost in progress
	Flashing	Dripping in progress
0	On	Measurement unit
Flashing Programming mode	Programming mode	
°F	On	Measurement unit
_	Flashing	Programming mode

#### HOW TO SEE THE SET POINT 5.1

- Push and immediately release the SET key, the set point will be showed;
- Push and immediately release the SET key or wait about 5 sec to return to normal visualisation

#### HOW TO CHANGE THE SETPOINT

- Push the SET key for more than 2 sec to change the Set point value;
  The value of the set point will be displayed and the ""C" or ""F" LED starts blinking;
  To change the Set value, push the o or n arrows within 10 sec.
  To memorise the new set point value push the SET key again or wait for 10 sec.

#### 5.3 HOW TO START A MANUAL DEFROST

Push the DEF \* key for more than 2 sec and a manual defrost will start

#### 5.4 HOW TO CHANGE A PARAMETER VALUE

To change the parameter's, value operate as follows

- Enter the Programming mode by pressing the SET+DOWN keys for 3 sec ("°C" or "°F" LED starts
- blinking). Select the required parameter. Press the **SET** key to display its value
- Use UP or DOWN to change its value.
   Press SET to store the new value and move to the following parameter.

To exit: press SET+UP buttons or wait for 15 sec without pressing any key.

NOTE: the set value is stored even when the procedure is exited by waiting the time-out to expire.

#### 5.5 HIDDEN MENU

The hidden menu includes all the parameters of the instrument.

#### HOW TO ENTER THE HIDDEN MENU

- Enter the Programming mode by pressing the SET+DOWN keys for 3s ("°C" or "°F" LED starts blinking).
- Released the keys, then push again the SET+DOWN keys for more than 7s. The L2 label will be displayed immediately followed from the Hy parameter.
  NOW YOU ARE IN THE HIDDEN MENU.
- Select the required parameter

- Press the SET key to display its value
  Use UP or DOWN to change its value.
  Press SET to store the new value and move to the following parameter.

To exit: Press SET+UP or wait for 15 sec without pressing any key.

NOTE1: if no parameter is present in L1, after 3 sec the "nP" message will be displayed. Keep the keys pushed till the L2 message eil be displayed.

NOTE2: the set value is stored even when the procedure is exited by waiting the time-out to expire.

#### HOW TO MOVE A PARAMETER FROM THE HIDDEN MENU TO THE FIRST LEVEL AND VICEVERSA

LEVEL AND VICEVERSA.

Each parameter present in the HIDDEN MENU can be removed or put into "THE FIRST LEVEL" (user level) by pressing SET+DOWN. In HIDDEN MENU when a parameter is present in First Level the decimal point is on

#### 5.6 TO LOCK THE KEYBOARD

- Keep pressed for more than 3 sec the **UP** and **DOWN** keys.
  The **'OF**' message will be displayed and the keyboard will be locked. If a key is pressed more than 3 sec the "**OF**" message will be displayed.

### 5.7 TO UNLOCK THE KEYBOARD

Keep pressed together for more than 3 sec the UP and DOWN keys till the "on" message will be

#### PARAMETERS

DECLII ATION

REG	REGULATION	
Ну	Differential: (0.1 to 25°C; 1 to 45°F) differential for set point. Compressor Cut IN is SET POINT + differential (Hy). Compressor Cut OUT is when the temperature reaches the set point.	
LS	Minimum SET POINT: (-55°C to SET; -67°F to SET) sets the minimum value for the set point.	
US	Maximum SET POINT: (SET to 99°C; SET to 99°F) set the maximum value for set point.	
ot	First probe calibration: (-9.9 to 9.9°C; -17 to 17°F) allows to adjust possible offset of the first probe.	
P2	Evaporator probe presence: n= not present; y= the defrost stops by temperature.	
οE	Second probe calibration: (-9.9 to 9.9°C; -17 to 17°F) allows to adjust possible offset of the second probe.	
od	Outputs activation delay at start up: (0 to 99min) this function is enabled at the initial start up of the instrument and inhibits any output activation for the period of time set in the parameter.	
AC	Anti-short cycle delay: (0 to 50 min) minimum interval between the compressor stop and the following restart.	
Су	Compressor ON time with faulty probe: (0 to 99min) time during which the compressor is active in case of faulty thermostat probe. With Cy=0 compressor is always OFF.	
Cn	Compressor OFF time with faulty probe: (0 to 99min) time during which the compressor is OFF in case of faulty thermostat probe. With Cn=0 compressor is always active.	

#### DISPLAY

CF	Measurement unit: (°C; °F) °C =Celsius; °F =Fahrenheit. WARNING: When the
	measurement unit is changed the SET point and the values of the parameters Hy, LS, US, oE, o1, AU, AL have to be checked and modified if necessary.
rE	Resolution (only for °C): (dE; in) dE= decimal between -9.9 and 9.9°C; in= integer
Ld	Default display: (P1; P2) P1= thermostat probe; P2= evaporator probe.

Display delay: (0 to 15min) when the temperature increases, the display is updated of 1°C or 1°F after this time.

#### DEFROST

- Defrost termination temperature: (-55 to 50°C: -67 to 99°F) if P2=Y it sets the temperature dF measured by the evaporator probe, which causes the end of defrost.

  Interval between defrost cycles: (0 to 99min) Determines the time interval between the
- beginning of two defrost cycles
- beginning on two derrost cycles.

  Maximum length for defrost: (0 to 99min, 0 means no defrost) when P2=n, (not evaporator probe: timed defrost) it sets the defrost duration, when P2 = y (defrost end based on temperature) it sets the maximum length for defrost.
- Display during defrost: (rt; it, SP; dF) rt= real temperature; it= start defrost temperature; SP= SET-POINT; dF= label dF. dF

#### ALARMS

- ΑU
- Maximum temperature alarm: (AL to 99°C; AL to 99°F) when this temperature is reached the alarm is enabled, after the "Ad" delay time.

  Minimum temperature alarm: (-55°C to AU, -67°F to AU) when this temperature is reached the alarm is enabled, after the Ad delay time. AL
- Temperature alarm delay: (0 to 99min) time interval between the detection of an alarm condition and alarm signalling.

  Exclusion of temperature alarm at startup: (0 to 99min) time interval between the detection Δн
- dΑ of the temperature alarm condition after instrument power on and alarm signalling.

#### OTHER

- d2 Evaporator probe display (read only)
- Parameter code table
- rl Software release

#### INSTALLATION AND MOUNTING



Instrument XR02CX shall be mounted on vertical panel in a instrument ANUCA state the mountained on ventural pariet, in a 28x71 mm hole, and fixed using the special bracket supplied. The temperature range allowed for correct operation is 0 to 60°C. Avoid places subject to strong vibrations, corrosive gases, excessive dirt or humidity. The same recommendations apply to probes. Let air circulate by the cooling holes.

#### 8 ELECTRICAL CONNECTIONS

The instrument is provided with screw terminal block to connect cables with a cross section up to 2.5mm². Before connecting cables make sure the power supply complies with the instrument's requirements. Separate the probe cables from the power supply cables, from the outputs and the power connections. Do not exceed the maximum current allowed on each relay, in case of heavier loads use a suitable external relay.

#### PROBES

The probes shall be mounted with the bulb upwards to prevent damages due to casual liquid infiltration. It is recommended to place the thermostat probe away from air streams to correctly measure the average room temperature. Place the defrost termination probe among the evaporator fins in the coldest place, where most ice is formed, far from heaters or from the warmest place during defrost, to prevent premature defrost termination.

#### 9 HOW TO USE THE HOT KEY

200	
9.1	HOW TO PROGRAM THE HOT KEY FROM THE INSTRUMENT
	(UPLOAD)

- Program one controller with the front keypad.

  When the controller is ON, insert the "Hot-key" and push Akey; the "uP" message appears followed
- a by flashing "En"
  Push "SET" key and the "En" will stop flashing.
  Turn OFF the instrument and then remove the "Hot-key". After that turn it ON again.

NOTE: the "Er" message is displayed for failed programming. In this case push again o key if you want to restart the upload again or remove the "Hot-key" to abort the operation.

#### HOW TO PROGRAM AN INSTRUMENT USING HOT KEY (DOWNLOAD)

- Turn OFF the instrument.

  Insert a programmed 'Hot Key' into the 5 PIN receptacle and then turn the Controller ON.
  Automatically the parameter list of the "Hot-key" is downloaded into the Controller memsage is blinking followed a by flashing "En".

  After 10 sec the instrument will restart working with the new parameters.

  Remove the "Hot-key".

NOTE: the "Er" message is displayed for failed programming. In this case push again o key if you want to restart the upload again or remove the "Hot-key" to abort the operation.

#### 10 ALARM SIGNALLING

Mess.	Cause	Outputs
"P1"	Room probe failure	Compressor output according to Cy e Cn
"P2"	Evaporator probe failure	Defrost end is timed
"HA"	Maximum temperature alarm	Outputs unchanged
"LA"	Minimum temperature alarm	Outputs unchanged

#### ALARM RECOVERY

Probe alarms "P1" and "P2" start some seconds after the fault in the related probe; they automatically stop some seconds after the probe restarts normal operation. Check connections before replacing the probe. Temperature alarms "HA" and "LA" automatically stop as soon as the temperature returns to normal values.

#### 11 TECHNICAL DATA

Housing: self extinguishing ABS Case: frontal 32x74 mm; depth 60mm

unting: panel mounting in a 71x29mm panel cut-out

Frontal protection: IP65

Connections: disconnectable terminal block ≤ 2.5 mm² wiring and 6.3mm fast-on

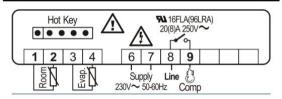
Power supply: according to the model ±10%; 230Vac ±10%, 50/60Hz, 110Vac ±10%, 50/60Hz

Power absorption: 3.5 VA max

Display: 2 digits, red LED, 14.2 mm high; Inputs: 2 NTC Relay outputs: compressor SPST 8(3) A, 250Vac; 20(8)A 250Vac

relay outputs: compressor 5°51 8(3) A, 2501/82; 200/82 Data storing; on the non-volable memory (EEPROM).
Kind of action: 18; Pollution grade: 2; Software class: A.
Rated impulsive voltage: 2500%; Overvoltage Category: II
Operating temperature: 01 60°C; Storage temperature: 30 to 85°C.
Relative humidity: 20 to 85% (not condensing)
Measuring and regulation range: NTC 40 to 110°C (-40 to 230°F).
Resolution: 0.1°C or 1°C or 1°F (selectable); Accuracy (ambient temp. 25°C): ±0.7°C ±1 digit.

#### 12 CONNECTIONS



NOTE: in case of 110Vac model, connect power supply to terminals 6-7.

#### 13 DEFAULT SETTING VALUES

LBL	DESCRIPTION	RANGE	VALUE	LEVEL
REGUI	LATION			
Ну	Differential	0.1 to 25°C; 1 to 45°F	2.0 °C	L1
LS	Minimum Set Point	-55°C to SET; -67°F to SET	-55 °C	L2
US	Maximum Set Point	SET to 99°C; SET to 210°F	99°C	L2
ot	First probe calibration	-9.9 to 9.9°C; -17 to 17°F	0.0	L2
P2	Second probe presence	n; Y	Y	L2
οE	Second probe calibration	-9.9 to 9.9°C; -17 to 17°F	0.0	L2
od	Outputs activation delay at start up	0 to 99 min	0	L2
AC	Anti-short cycle delay	0 to 50 min	0	L1
Су	Compressor ON time faulty probe	0 to 99 min	15	L2
Cn	Compressor OFF time faulty probe	0 to 99 min	30	L2
DISPL	AY			
CF	Measurement units	°C; °F	°C	L2
rЕ	Resolution (only for °C)	dE; in	dE	L1
Ld	Default Display	P1; P2	P1	L2
dy	Display delay	0 to 15 min	0	L2
DEFRO	OST			
dE	Defrost termination temperature	-50 to 50°C; -58 to 122°F	8.0 °F	L1
id	Interval between defrost cycles	0 to 99 hours	6	L1
Md	Maximum length for defrost	0 to 99 min.	30	L1
dF	Display during defrost	rt; in; dE	lt	L2
ALARI	WS			
AU	Maximum temperature alarm	ALL to 99°C; ALL to 210°F	99 °C	L2
AL	Minimum temperature alarm	-55°C to ALU; -67°F to ALU	-55 °C	L2
Ad	Temperature alarm delay	0 to 99 min	15	L2
dA	Exclusion of temperature alarm at startup	0 to 99 min	99	L2
OTHER	₹			
d2	Evaporator probe display	Read Only	10000	L1
Pt	Parameter code table	Read Only		L2
rL	Firmware release	Read Only		L2





Dixell S.r.l. - 32010 Pieve d'Alpago (BL) ITALY - Z.l. Va dell'Industria, 27 Tel. +39.0437.9833 r.a. - Fax +39.0437.989313 - www.dixell.com - dixell@emerson.com





FICHA TÉCNICA

R-410A

#### Características y aplicaciones

El R-410A es una mezcla casi azeotrópica compuesta de R-125 y R-32; actualmente se utiliza fundamentalmente en los nuevos equipos de aire acondicionado que van apareciendo en el mercado. Es un producto químicamente estable, con un bajo deslizamiento (Glide) de temperatura y baja toxicidad. A pesar del carácter inflamable del R-32, la formulación global del producto hace que este no sea inflamable, incluso en caso de fugas. Está clasificado como A1 grupo L1.

#### Toxicidad y almacenamiento

El R-410A tiene muy baja toxicidad incluso después de repetidas exposiciones. El valor del AEL (Allowance Exposure Limit) es de 1000 ppm (8 horas TWA). Los envases que contengan R-410A deben almacenarse en áreas frías y ventiladas lejos de fuentes de calor. En el caso de fugas los vapores se concentrarán a nivel de suelo desplazando al oxígeno del aire ambiente; en tal caso hay que tomar precauciones a la hora de evacuar el área afectada.

#### Componentes

Nombre químico	% en peso	N° CAS	N° . CE
Pentafluoroetano (R-125)	50	354-33-6	206-557-8
Difluorometano (R-32)	50	75-10-5	200-839-4

#### Propiedades físicas

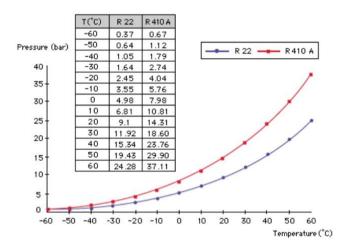
PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	R-410A
Peso molecular	(g/mol)	72.6
Temperatura ebullición (a 1,013 bar)	(°C)	-51.58
Deslizamiento temperatura de ebullición (a 1,013 bar)	(K)	0.1
Temperatura crítica	(°C)	72.13
Presión crítica	(bar abs)	49.26
Densidad crítica	(Kg/m³)	488.90
Densidad del líquido (25°C)	(Kg/m³)	1062
Densidad del líquido (-25°C)	(Kg/m³)	1273
Densidad del vapor saturado (25°C)	(Kg/m³)	65.92
Presión del vapor (25°C)	(bar abs)	16.5
Presión del vapor (-25°C)	(bar abs)	3.30
Calor de vaporización a punto de ebullición	(KJ/Kg)	276
Calor específico del líquido (25°C)	(KJ/Kg K)	1.84
Calor específico del vapor (25°C) (1 atm)	KJ/Kg K)	0.83
Conductibilidad térmica del líquido (25°C)	(W/mK)	0.088
Conductibilidad térmica del vapor (25°C) (1 atm)	(W/mk)	0.013
Solubilidad con el agua (25°C)	ppm	despreciable
Límite de inflamabilidad	(% vol.)	Ninguno
Toxicidad (AEL)	ppm	1000
ODP	-	0
PCA (GWP)	•	2088*

<sup>\*</sup> De acuerdo con IPPCC-AR4/CIE (Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático)-2007





## Gráfica comparativa temperatura / presión R-22- R-410A



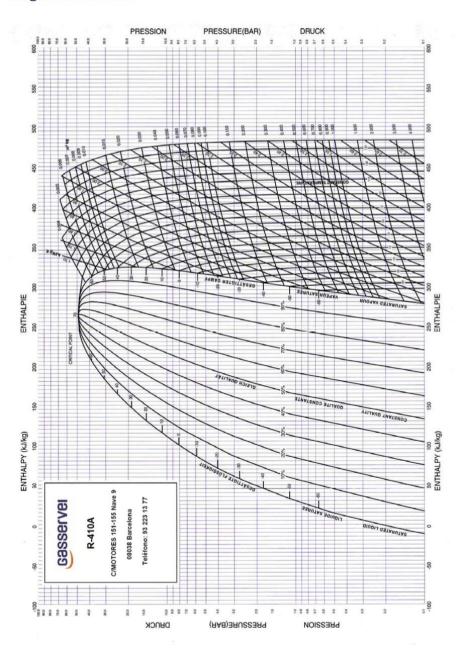
### Tabla de presión / temperatura

	PRESIÓN A	BSOLUTA	DENS	IDAD	ENTA		ENTROPÍA			
TEMP.	(kP	a)	(Kg/	(Kg/m³)		Kg)	(kJ/Kg.K)			
(°C)	BURBUJA	ROCÍO	BURBUJA	ROCÍO	BURBUJA	ROCÍO	BURBUJA	ROCÍO		
-50	109.7	109.4	1358.9	4.500	127.3	402.2	0.7052	1.9372		
-45	139.9	139.5	1342.5	5.660	134.2	404.7	0.7361	1.9217		
-40	176.2	175.8	1325.7	7.045	141.1	407.1	0.7666	1.9072		
-35	219.6	219.0	1308.6	8.685	148.2	409.4	0.7968	1.8936		
-30	270.8	270.1	1291.2	10.613	155.3	411.6	0.8267	1.8807		
-25	330.9	329.9	1273.3	12.866	162.5	413.7	0.8562	1.8685		
-20	400.7	399.5	1255.0	15.486	169.8	415.7	0.8855	1.8569		
-15	481.3	479.9	1236.2	18.519	177.2	417.6	0.9145	1.8457		
-10	573.9	572.1	1216.9 22.	22.016	184.7	419.4	0.9432	1.8351		
-5	679.3	677.3	1197.1	26.036	192.3	421.0	0.9717	1.8247		
0	799.0	796.5	1176.7	30.649	200.0	422.5	1.0000	1.8147		
5	933.9 1085.5	931.0	1155.5	35.931	207.8	423.9	1.0281	1.8049		
10		1082.0	1133.7	41.977	215.7	425.1	1.0560	1.7953		
15	1254.9	1250.8	1110.9	48.897	223.8	426.1	1.0838	1.7857		
20	1443.6	1438.8	1087.2	1087.2	56.825	232.0 426.8	426.8	1.1116	1.7760	
25	1652.9	1647.4	1062.4	65.924	240.4	427.3	1.1394	1.7662		
30	1884.2	1877.9	1036.3	76.398	249.1	427.6	1.1674	1.7562		
35	2139.2	2132.0	1008.6	88.506	257.9	427.5	1.1956	1.7458		
40	2419.3	2411.1	978.9	102.585	267.1	427.0	1.2243	1.7348		
45	2726.1	2717.0	946.8	119.085	276.7	426.0	1.2537	1.7230		
50	3061.3	3051.5	911.4	138.645	286.9	424.6	1.2843	1.7104		





## Diagrama de Mollier





## Manual para el equipo de refrigeración Chiller en la columna de absorción del LOPU

#### Procedimiento para inicio y limpieza del equipo

#### ➤ Limpieza del equipo.

- 1) Llenar el tanque cisterna de agua de la columna de absorción.
- 2) Cerrar la llave roja que esta previa al flujómetro en la columna y abrir la válvula V-105 de la columna de absorción
- 3) Conectar el extremo C-101 de la maguera al acople A-101 del mezclado en la columna de absorción. El otro extremo C-102 de la maguera al acople A-102 del chiller.
- 5) Conectar el extremo C-103 de otra manguera al acople A-103 del chiller. El otro extremo de esta manguera tiene que esta apuntando hacia las rendijas de desfogue de agua del laboratorio.
- 6) Encender la bomba de la columna de absorción y apagar una vez el visor de nivel de líquido del chiller llegue hasta la línea negra.
- 7) Proceda a encender el chiller y cebar la bomba.
- 8) Para **cebar la bomba** se necesita abrir la válvula V-101 y cerrar la V-102. Una vez se vea que corre agua en la maguera transparente que esta luego de la válvula V-101, el proceso de cebado se encuentra culminado



9) Para que la salida de agua, se debe abrir la válvula V-102 y cerrar la V-101.



10) Repetir este proceso al menos 3 veces o hasta que el agua salga limpia. El proceso de cebado solo es requerido la primera vez.

Versión: 1-2024	Ingeniería Química. ESPOL –
	FCNM



## Manual para el equipo de refrigeración Chiller en la columna de absorción del LOPU

#### ➤ Operación del equipo

1) El tanque de líquido del chiller se debe encontrar al nivel de la línea negra.



- 2) El tanque de agua de la columna de absorción debe estar lleno con al menos 200 litros, que representa la línea negra demarcada en el tanque
- 3) Conectar el extremo C-101 de la maguera al acople A-101 del mezclado en la columna de absorción. El otro extremo C-102 de la maguera al acople A-102 del chiller.
- 4) Conectar el extremo C-103 de otra manguera al acople A-103 del chiller. El otro extremo de esta manguera tiene que estar sumergido en el tanque de agua de la columna de absorción.
- 5) Cerrar la llave roja que esta previa al flujómetro en la columna y abrir la válvula V-105 de la columna de absorción.



- 6) La válvula V-101 debe estar cerrada y la V-102 abierta.
- 7) Se enciende el equipo y comienza a refrigerar.
- 8) El ventilador del chiller debe estar apuntando a un lugar despejado sin obstrucciones para que se disipe mejor el calor.

Versión: 1-2024	Ingeniería Química. ESPOL –
	FCNM



## Manual para el equipo de refrigeración Chiller en la columna de absorción del LOPU

- 9) Se debe verificar que el nivel del tanque de agua de la columna no disminuya considerablemente, por lo que, si sucede, se debe apagar la bomba de la columna por 20 segundos, hasta que retome un nivel inicial
- 10) Esperar durante 50-60 minutos que se enfríe el agua hasta los 9 °C.

#### ➤ Parada del equipo

- 1) Una vez alcanzado los 9°C, se debe vaciar todo el volumen de líquido del chiller al tanque de la columna.
- 2) Se debe apagar el equipo una vez se encuentre vacío.

#### > Carga de refrigerante

- 1) Señales y verificación de bajo refrigerante:
  - Verificar presiones con el sistema funcionando:
    - o Si la presión de baja está por debajo de 90 PSI (R-410A)
    - Si la presión de alta está por debajo de 320 PSI (R-410A)
  - Otros indicadores:
    - o Formación de hielo en la línea de succión
    - o Burbujeo en el visor de líquido
    - Temperatura de salida del agua más alta de lo normal
- 2) Preparación para la carga:
  - Apagar el sistema

Versión: 1-2024

Conectar manómetros y tanque de refrigeración





## Manual para el equipo de refrigeración Chiller en la columna de absorción del LOPU



- Purgar las mangueras
- 3) Proceso de carga:
  - Abrir válvula del tanque y del lado de baja
  - Esperar 15 minutos con el compresor apagado
  - Monitorear presiones constantemente
  - Detener la carga cuando se alcancen los valores objetivo

#### Para R-410A:

- o Presión de baja: Cargar hasta alcanzar 100-120 PSI
- o Presión de alta: Debe llegar a 350-400 PSI

#### 4) Verificación final:

- Arrancar el sistema
- Confirmar que las presiones se mantienen estables
- Verificar que no hay burbujas en el visor de líquido
- Comprobar que la temperatura de salida del agua es correcta

#### Recomendaciones importantes:

- Siempre cargar por el lado de baja presión
- No sobrecargar el sistema
- Verificar que no haya fugas antes de carga

Versión: 1-2024	Ingeniería Química. ESPOL –
	FCNM

## Apéndice B Cálculos totales

### **CONDICIONES INICIALES**

Flujo de líquido (LPM)	Flujo de CO <sub>2</sub> (LPM)	Velocidad de aire (m/s)	Temperatura (°C)
10	3	1,2	27
Diáme	0,01905		

## Fracción molar de CO2 en la entrada del gas

Caudal de aire (LPM): 20,52

Base de Cálculo: 1 minuto

0

150

6,12 6,13 4,41 4,37 9,5

Compuesto	Volumen por	Densidad	Masa por	Fracción	Peso molecular	Moles	Fracción
Compuesto	componente (L)	(kg/L)	componente (kg)	másica	(kg/kmol)	(kmol)	molar
CO2	3	0,00177	0,00531	0,1824	44	0,000120744	0,128
Aire	20,52	0,00116	0,02382	0,8176	28,84	0,000825954	0,872
	23,52		0,02913	1		0,000946698	1

## **RESULTADOS DE PRUEBAS**

## PRIMERA PRUEBA

		Prueba con aş	gua fría (9°C	(1)		Prueba	con agua amb	oiente (30°C)	
Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH inicial	pH final	HCl consumido (ml)	Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH inicial	pH final	HCl consumido (ml)

0

150

7,55 7,68 4,4 4,35 1,4 1,3

3	6,04	6,02	4,56	4,47	10	10,3
5	5,84	5,87	4,39	4,4	10	9,9
8	5,67	5,64	4,49	4,35	10,1	10,2
10	5,47	5,43	4,48	4,43	10,3	10,5
13	5,33	5,31	4,76	4,5	10,2	10,5

	6,04	6,02	4,56	4,47	10	10,3		3		6,76	6,82	4,44	4,49	1,5	1,5
	5,84	5,87	4,39	4,4	10	9,9	•	5		5,97	5,97	4,14	4,28	1,6	1,5
	5,67	5,64	4,49	4,35	10,1	10,2		8		5,94	5,95	4,1	4,42	2,4	1,4
	5,47	5,43	4,48	4,43	10,3	10,5		10		5,91	5,89	4,46	4,2	0,6	1,6
	5,33	5,31	4,76	4,5	10,2	10,5		13		5,89	5,99	4,14	4,13	1,5	1,3
Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)		4,780	63E-06	-	Conce	ntración I	H <sup>+</sup> (mo	l/L)	1,51	36E-06	<u> </u>				

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	4,7863E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	34,5
Concentración HCO3 (mol/L)	0,00056557
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,0828E-05
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,00636943
Fracción molar de CO <sub>2</sub>	0,00011468

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	1,5136E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	4,66666667
Concentración HCO3 <sup>-</sup> (mol/L)	7,6503E-05
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	4,6317E-07
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,00027245
Fracción molar de CO <sub>2</sub>	4,9252E-06

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
10	0,99977	18	9,257
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
23,52	30,7735376	0,0012510	0,0159

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
18	0,99571	18	16,595
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
15,6811	30,7735376	0,00123857	0,0105188

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	<b>x</b> 1	<b>x2</b>	y1	y2
9,2571	0,0159	0,00011468	0	0,12754	0,06026

Lm	Gm	<b>x1</b>	<b>x2</b>	y1	
(mol/s)	(mol/s)				
16,595	0,01051	4,9252E-06	0	0,1275	0,119771

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	0/ aba CO.
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	%abs CO <sub>2</sub>
0,12195122	0,00106157	0,870488%

Concentración CO<sub>2</sub> (mol/L)

Fracción molar de CO2

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs		
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	$CO_2$		
0,08049585	8,1735E-05	0,10154%		

Concentración CO<sub>2</sub> (mol/L)

Fracción molar de CO2

0,000727

1,315E-05

## SEGUNDA PRUEBA

	Prueba con agua fria (9°C)							Prueba	con ag	ua ami	piente	(30°C)				
Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH i	nicial	pН	final	consu	Cl umido nl)		Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH i	nicial	pН	final		Cl umido nl)
0		6,33	6,31	4,48	4,42	9,3	9,6		0		7,4	7,1	4,3	4,53	1,2	1,5
3	_	6,01	6,07	4,36	4,34	11,5	11,3		3	- 150 - 	6,52	6,55	4,14	4,13	1,5	1,3
5	- 150	5,86	5,83	4,47	4,4	9,8	9,7		5		5,84	5,8	4,25	4,23	1,4	1,5
8		5,61	5,68	4,43	4,36	10,4	10,1		8		5,4	5,76	4	4,05	1,6	1,6
10	_	5,46	5,43	4,32	4,5	10,4	10,9		10		5,5	5,51	4,23	3,9	1,8	1,7
12	-	5,27	5,32	4,32	4,37	10,9	10,7	_	12		5,39	5,54	4,03	4,19	1,7	1,6
	Concentración H <sup>+</sup> (mol/L) Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L) Concentración HCO <sub>3</sub> - (mol/L)		3	70E-06 6,00		Concentración H <sup>+</sup> (mol/l Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /		)3/ <b>L</b> )	/L) 5,5		_					
				- `			02E-04			tración HC	- \			16E-05		
	Con	icentra	ción H	2CO3 (1	mol/L)	1,19	97E-05		Concen	tración H <sub>2</sub> (	CO3 (n	nol/L)	1,2	36E-06		

0,007040

1,268E-04

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
10	0,99977	18	9,257
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
23,52	( <b>kg/kmol</b> ) 30,7735376	0,0012510	0,0159

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
18	0,99571	18	16,595
Gm (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
15,6811	30,7735376	0,00123857	0,0105188

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	<b>x</b> 1	<b>x2</b>	y1	y2
9,2571	0,0159	1,27E-04	0	0,128	0,0532

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	x1	<b>x2</b>	y1	y2
16,595	0,01051	1,31E-05	0	0,268	0,2502

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	9/ aba CO	
$G_1$	$L_1$	%abs CO <sub>2</sub>	
0,1220	1,17E-03	0,9622%	

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	$CO_2$
0,2012	2,18E-04	0,1084%

## TERCERA PRUEBA

|--|

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH inicial		pH final		HCl consumido (ml)	
0		6,22	6,2	4,47	4,31	10,2	9,8
3	150	5,98	6,03	4,28	4,43	10,3	9,7
5	-	5,87	5,85	4,35	4,29	9,6	10,1

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH i	nicial	pН	final	Ho consu (n	ımido
0		7,27	7,24	4,02	4,22	2,4	2,3
3	150	6,06	6,1	4	3,7	2	1,8
5		6,05	6,08	3,93	4,14	3,1	2,6

8	5,53	5,59	4,44	4,38	9,9	10,3
10	5,32	5,38	4,26	4,41	10,4	9,8
12	5,25	5,28	4,33	4,46	9,2	9,5

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	5,433E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	31,17
Concentración HCO3 (mol/L)	5,109E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,110E-05
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,006531
Fracción molar de CO2	1,176E-04

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
10	0,99977	18	9,257
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
23,52	30,7735376	0,0012510	0,0159

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	x1	<b>x2</b>	y1	y2	Ln (mol
9,2571	0,0159	1,18E-04	0	0,128	0,0592	12,9

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs CO <sub>2</sub>	Mol CO
$G_1$	L <sub>1</sub>	0.90260/	$\frac{G_1}{G_1}$
0,1220	1,09E-03	0,8926%	0,1207

8	6,04	6,03	3,78	4,05	3	3,5
10	5,98	6,2	3,99	3,83	3,6	2,9
12	5,93	5,94	4,17	3,81	2,3	3,9

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	1,161E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	10,33
Concentración HCO3 <sup>-</sup> (mol/L)	1,694E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	7,870E-07
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,000463
Fracción molar de CO <sub>2</sub>	8,369E-06

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
14	0,99571	18	12,907
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
23,52	30,77	0,00124	0,0158

	Lm	Gm x1		<b>x</b> 2	v1	v2
(	(mol/s)	(mol/s)	XI	XZ	y1	y 2
	12,907	0,0158	8,37E-06	0	0,128	0,1207

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	$CO_2$
0,1207	1,08E-04	0,0895%

## CUARTA PRUEBA

## Prueba con agua fría (9°C)

## Prueba con agua ambiente (30°C)

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH iı	nicial	pН	final	consu	Cl ımido ıl)
0		6,27	6,25	4,37	4,42	10,3	9,6
3	-	5,85	5,87	4,27	4,48	10,8	9,9
5	150	5,69	5,66	4,34	4,45	10,4	9,7
8	130	5,52	5,51	4,39	4,29	10,2	10,9
10		5,41	5,38	4,47	4,36	9,8	10,5
13	-	5,36	5,29	4,43	4,5	11	11,2

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH i	nicial	pH t	final	Ho consu (m	mido
0		7,37	7,28	4,1	4,23	2,6	2,5
3	150	5,72	5,7	3,81	3,9	2,7	2,1
5		5,68	5,69	4,04	3,88	3,1	3,4
8		5,67	5,66	4,1	4,12	2,8	1,9
10		5,56	5,59	4,06	3,8	2,2	2,9
13	•	5,58	5,55	4,07	4,13	2,4	1,7

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	4,732E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	37,00
Concentración HCO <sub>3</sub> (mol/L)	6,066E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,148E-05
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,006753
Fracción molar de CO2	1,216E-04

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	2,723E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	6,83
Concentración HCO <sub>3</sub> (mol/L)	1,120E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,220E-06
Concentración CO2 (mol/L)	0,000718
Fracción molar de CO2	1,297E-05

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
10	0.99977	18	9,257

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
14	0.99571	18	12,907

G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
23,52	30,7735376	0.0012510	0,0159

G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	Gm (mol/s)
23,52	30,77	0,00124	0,0158

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	x1	<b>x2</b>	y1	y2
9,2571	0,0159	1,22E-04	0	0,128	0,0569

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	<b>x1</b>	<b>x2</b>	y1	y2
12,907	0,0158	1,30E-05	0	0,128	0,1169

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs CO <sub>2</sub>
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	70abs CO2
0,1220	1,13E-03	0,9229%

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	$CO_2$
0,1207	1,67E-04	0,1387%

## QUINTA PRUEBA

Prueba	con	agua	fría	(9°	<b>C</b> )
--------	-----	------	------	-----	------------

## Prueba con agua ambiente (30°C)

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH iı	nicial	pH 1	final	consu	Cl ımido nl)
0		6,17	6,19	4,39	4,27	9,7	10,4
3	•	6,01	5,99	4,36	4,48	10,8	9,9
5	150	5,76	5,82	4,43	4,29	10,2	9,6
8	130	5,53	5,6	4,41	4,34	10,1	10,5
10		5,38	5,42	4,46	4,38	9,8	10,7
13	•	5,22	5,27	4,45	4,32	9,2	9,6

Tiempo (min)	Vol. Muestra (ml)	pH i	nicial	pН	final	const	Cl imido nl)
0		7,55	7,68	4,28	4,46	1,4	0,09
3		5,97	5,97	4,33	4,4	1,8	1,6
5	150	5,89	5,99	4,29	4,38	2,2	1,7
8	130	5,9	5,88	4,44	4,35	1,3	1,9
10		5,77	5,86	4,31	4,42	1,6	2
13	•	5,63	5,59	4,37	4,23	2,4	2,1

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	5,689E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	31,33
Concentración HCO3 <sup>-</sup> (mol/L)	5,137E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,169E-05
Concentración CO <sub>2</sub> (mol/L)	0,006875
Fracción molar de CO2	1,238E-04

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)
10	0,99977	18	9,257
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)
	(kg/kmol)	(Kg/L)	(11101/8)
23,52	30,7735376	0,0012510	0,0159

Lm (mol/s)	Gm (mol/s)	<b>x</b> 1	<b>x2</b>	y1	y2	Lm (mol/s)
9,2571	0,0159	1,24E-04	0	0,128	0,0556	12,907

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs CO <sub>2</sub>
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	70abs CO2
0,1220	1,15E-03	0,9396%

Concentración H <sup>+</sup> (mol/L)	2,455E-06
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	7,50
Concentración HCO3 <sup>-</sup> (mol/L)	1,230E-04
Concentración H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mol/L)	1,207E-06
Concentración CO2 (mol/L)	0,000710
Fracción molar de CO2	1,284E-05

L <sub>m</sub> (L/min)	Densidad (kg/L)	Peso molecular (kg/kmol)	L <sub>m</sub> (mol/s)	
10	0,99571	18	9,220	
G <sub>m</sub> (L/min)	Peso molecular (kg/kmol)	Densidad (kg/L)	G <sub>m</sub> (mol/s)	
23,52	30,77	0,00124	0,0158	

Lm	Gm	x1	x2	v1	w2	
(mol/s)	(mol/s)	XI	X2	уı	y <b>2</b>	
12,907	0,0158	1,28E-05	0	0,128	0,1200	

Mol CO <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>	%abs
$G_1$	$\mathbf{L_1}$	$CO_2$
0,1207	1,18E-04	0,0980%

Apéndice C Costos detallados

Parámetro	Item	Cantidad	Precio unitario	Valor	
	Condensador de tubos y aletas	1	\$236,40	\$	236,40
	Motor ventilador	1	\$124,15	\$	124,15
	Evaporador (tanque de inmersión tubular – considerando aislante y otros componentes internos)	1	\$500	\$	500,00
Costos de fabricación	Compresor hermético rotativo de 1.8 HP	1	\$196,43	\$	196,43
	Dispositivo de expansión	1	\$100	\$	100,00
	Bomba de agua de recirculación de 4.5 HP	1	\$152,54	\$	152,54
	Componentes internos (Sistema de control, tubos, conexiones, etc.)	1	\$150	\$	150,00
TOTAL COSTOS 1				\$	1.460
	Neplos 1/2"	3	\$0,35	\$	1,05
	Cinta teflon	2	\$0,29	\$	0,58
	Acople rapido tipo c	3	\$4,23	\$	12,69
Costos de	Acople rapido tipo a	3	\$2,08	\$	6,24
mplementación	Manguera plástica	6 m	\$2,64/m	\$	15,84
	Abrazadera británica	3	\$ 0,35	\$	1,05
	Enchufe tipo chino	1	\$ 3,74	\$	3,74
	Reductor 1/2" a 3/4"	3	\$ 0,15	\$	0,45

	Válvula esférica 1/2"	1	\$3,73	\$	3,73		
	Portamanguera	1	\$1,73	\$	1,73		
	Aislante	2 mt <sup>2</sup>	\$7,00/m <sup>2</sup>	\$	14,00		
	Cemento de contacto	1	\$3,53	\$	7,06		
	TOTAL COSTO	S 2		\$	68,16		
	Consumo de agua						
	Prueba 1 de enfriamiento	60 L	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,01380		
	Prueba 2	100 L	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,02300		
	Prueba 3	100 L	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,02300		
	Prueba 4	110 L	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,02530		
	Prueba 5	200 L	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,04600		
Costos de operación	Pruebas de absorción	140 L/prueba * 10 pruebas	\$0,23/m <sup>3</sup>	\$	0,32200		
(Considerando	Consumo de electricidad						
pruebas de enfriamiento y pruebas de absorción)	Prueba 1 de enfriamiento	1,187 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,10925		
	Prueba 2	2,354 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,21657		
	Prueba 3	2,6257 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,24156		
	Prueba 4	2,8259 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,25998		
	Prueba 5	3,8265 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,35204		
	Pruebas de absorción (10 pruebas de 13 minutos)	6,1685 kWh	\$0,092/kWh	\$	0,56751		
TOTAL COSTOS 3				\$	2,20002		
COSTOS TOTALES					1.530,36		