

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

Propuesta técnica de oportunidades de mejora e implementación para los equipos: torre de enfriamiento, tanque agitado con aireación y torre de pared húmeda del Laboratorio de Ingeniería Química

Práctica Dirigida de Graduación sometida a consideración de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Fernando Barboza Montenegro

Ciudad Universitaria “Rodrigo Facio”

San José – Costa Rica

2021

Tribunal Examinador

Práctica Dirigida de Graduación sometida a consideración de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Fernando Barboza Montenegro

Sustentante

Aprobado por:



Ing. Esteban Durán Herrera, PhD.
Presidente del Tribunal



Ing. Adolfo Ulate Brenes, M.Sc.
Director de la Práctica Dirigida
Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica



Ing. Esteban Richmond Salazar
Miembro Asesor
Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica



Ing. Natalia Montero Rambla
Miembro Asesor
Profesora de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica



Ing. José Andrés Santamaría Cordero
Miembro Invitado
Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica

Dedicatoria

A mis padres, Marvin y Nidia, por siempre creer en mí y por su sacrificio y ayuda incondicional.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por la vida y por la oportunidad de finalizar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Marvin y Nidia, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo a lo largo de todos mis años de vida.

A mi tío Giovanni y Gabriela, por su ayuda incondicional durante toda mi carrera universitaria.

A mi profesor director, Ing. Adolfo Ulate, M.Sc. por su ayuda invaluable para la realización y finalización de mi Práctica Dirigida.

A mis profesores lectores Ing. Esteban Richmond e Ing^a. Natalia Montero, por su ayuda y sus consejos a durante la realización de mi Práctica.

A don Olman y Emilio, por su ayuda, su paciencia y su tiempo.

A la Escuela y Taller de Ingeniería Mecánica, especialmente a los profesores Ing. Luis Rapso, Ing. Eduardo Rojas e Ing. Rodolfo Soto, por su siempre excelente disposición para ayudarme.

Al Taller de Soplado de Vidrio de la Escuela de Química, al Taller de Óptica y al Taller de Soldadura y su personal respectivo, por la ayuda brindada.

A los profesores Ing. Mauricio Espinoza, Ph.D e Ing. Osvaldo Fernández de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por su valiosa ayuda.

Y a mi novia, María José, por su apoyo incondicional, su paciencia y su ayuda en los momentos más difíciles.

Resumen

En este trabajo se realizó la identificación, selección, diseño conceptual, construcción y evaluación de oportunidades de mejora para los equipos torre de pared húmeda, tanque agitado con aireación y torre de enfriamiento del Laboratorio de Ingeniería Química, para ser utilizados por los estudiantes en sus prácticas de laboratorio.

Primeramente, se estudió el funcionamiento inicial de los equipos. Se identificó errores en su funcionamiento, así como otras oportunidades de mejora, las cuales se decidió ejecutar de acuerdo a criterio técnico. Para cada una de estas mejoras se realizó un diseño conceptual, en el cual se definió parámetros tales como las dimensiones, materiales o condiciones a las que el equipo debía operar; esto también basado en criterio técnico, o en los principios de funcionamiento de los equipos.

Estas mejoras, después fueron construidas de acuerdo a su diseño planteado. Hubo ocasiones en las cuales fue necesaria la modificación de su diseño, o inclusive, no fue posible en su totalidad la construcción de alguna mejora por razones justificadas. Siendo el caso más importante, la imposibilidad de aumentar la potencia de calentamiento de la torre de enfriamiento, ya sea mediante electricidad o vapor.

Por último, estas mejoras fueron evaluadas por medio de corridas experimentales, en las que se comprobó que los equipos trabajan a las condiciones planteadas y que es posible llevar a cabo satisfactoriamente una práctica de laboratorio con cada uno de los equipos. Para esto, se confeccionó un manual de laboratorio para cada práctica, así como un manual de equipo para cada uno de estos.

Índice General

Tribunal Examinador	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Índice General.....	v
Índice de cuadros.....	x
Índice de figuras.....	xiii
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
Capítulo 2.....	3
Marco teórico	3
2.1. Torre de pared húmeda	3
2.1.1. Absorción de un soluto en una corriente gaseosa	5
2.1.2. Difusión de vapor en la corriente gaseosa	7
2.2. Torre de enfriamiento.....	8
2.2.1. Humedad absoluta del aire.....	9
2.2.2. Humedad relativa del aire	9
2.2.3. Temperatura de bulbo húmedo	10
2.2.4. Análisis de la torre de enfriamiento	10
2.3. Tanque agitado con aireación.....	13

Capítulo 3	18
Metodología.....	18
3.1. Investigación	18
3.2. Descripción del estado inicial de los equipos	18
3.3. Selección de las mejoras	18
3.4. Diseño conceptual.....	19
3.5. Construcción de las mejoras	19
3.6. Evaluación de las mejoras y los equipos	19
3.7. Redacción de los manuales de equipo y laboratorio	19
Capítulo 4.....	20
Descripción del estado inicial de los equipos	20
4.1. Torre de pared húmeda	20
4.1.1. Descripción del equipo	20
4.1.2. Operación del equipo	25
4.1.3. Procedimiento de operación	26
4.1.4. Observaciones de la operación.....	27
4.1.5. Módulos similares de fabricantes reconocidos	27
4.2. Torre de enfriamiento.....	34
4.2.1. Descripción del equipo	34
4.2.2. Operación del equipo del equipo	40
4.2.3. Procedimiento de operación	40
4.2.4. Módulos similares de fabricantes reconocidos	41
4.3. Tanque agitado con aireación.....	44

4.3.1. Descripción del equipo	44
4.3.2. Procedimiento de operación	48
4.3.3. Módulos similares de fabricantes reconocidos	50
Capítulo 5	52
Herramienta para la selección de las mejoras a realizar	52
5.1. Torre de pared húmeda	52
5.2. Torre de enfriamiento	59
5.3. Tanque agitado con aireación	67
Capítulo 6	75
Diseño y construcción de las mejoras seleccionadas	75
6.1. Torre de pared húmeda	75
6.2. Torre de enfriamiento	88
6.3. Tanque agitado con aireación	104
Capítulo 7	113
Puesta en marcha de los equipos	113
8. Beneficios teórico-prácticos y limitaciones de la Práctica Dirigida de Graduación	131
9. Conclusiones y recomendaciones	133
9.1. Conclusiones	133
9.2. Recomendaciones	134
10. Nomenclatura	137
Bibliografía	141
Apéndices	145
Apéndice A. Datos experimentales	146

A.1. Datos experimentales para la torre de pared húmeda	146
A.2. Datos experimentales para el tanque agitado con aireación.....	147
A.3. Datos experimentales para la torre de enfriamiento.....	149
Apéndice B. Datos intermedios	150
B.1. Datos intermedios para la torre de pared húmeda	150
B.2. Datos intermedios para el tanque agitado con aireación	155
B.3. Datos intermedios para la torre de enfriamiento.....	157
Apéndice C. Muestra de cálculo	162
C.1. Muestra de cálculo para la torre de pared húmeda	162
C.2. Muestra de cálculo para el tanque agitado.	166
C.3. Muestra de cálculo para la torre de enfriamiento.	167
Apéndice D: Guías de laboratorio.....	171
D.1. Guía de laboratorio para la práctica de torre de pared húmeda	171
D.2. Guía de laboratorio para la práctica de tanque agitado con aireación.....	184
D.3. Guía de laboratorio para la práctica de torre de enfriamiento.....	196
Apéndice E: Manuales de equipo	207
E.1. Manual de equipo para la torre de pared húmeda	207
E.2. Manual de equipo para el tanque agitado con aireación	213
E.3. Manual de equipo para la torre de enfriamiento de tiro inducido	220
Apéndice F. Códigos de programación para la automatización de la toma de datos	224
F.1. Código de programación para la automatización de la toma de datos en el tanque agitado con aireación.....	224

F.2. Códigos de programación para la automatización de la toma de datos en la torre de pared húmeda.....	225
Anexos.....	233

Índice de cuadros

Cuadro 1. Potencia disipada por ambas torres de enfriamiento del laboratorio para distintos flujos de agua.....	59
Cuadro 2. Condiciones alcanzadas en el estado estacionario en ambas torres de enfriamiento utilizando la potencia instalada.....	60
Cuadro 3. Dimensiones originales de los tubos de vidrio donados por el Taller de Óptica de la Universidad de Costa Rica.....	75
Cuadro 4. Datos medidos en el experimento de torre de pared húmeda.....	77
Cuadro 5. Datos medidos para la calibración del rotámetro.....	94
Cuadro 6. Coeficientes de transferencia de masa calculados para la torre de pared húmeda.....	114
Cuadro 7. Parámetros para la correlación del coeficiente de transferencia de masa.....	115
Cuadro 8. Coeficientes de transferencia de masa calculados para cada corrida.....	120
Cuadro 9. Parámetros de ajuste para la correlación del coeficiente de transferencia de masa en el tanque agitado.....	122
Cuadro 10. Resultados del experimento de torre de enfriamiento.....	126
Cuadro 11. Parámetros de ajuste para la correlación de Kelly y Swenson.....	127
Cuadro 12. Parámetros adimensionales de ajuste del modelo de Kloopers y Kroger.....	128
Cuadro 13. Datos medidos en la primera corrida en la torre de pared húmeda, a un flujo de aire de 15 L min^{-1} y uno de agua de $1000 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$	146
Cuadro 14. Datos medidos en la primera corrida para el tanque agitado.....	147
Cuadro 15. Datos medidos en la operación de la torre de enfriamiento.....	149
Cuadro 16. Datos generales para el experimento de torre de pared húmeda.....	150
Cuadro 17. Presiones de saturación y presiones parciales de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.....	150
Cuadro 18. Fracciones molares de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.....	151

Cuadro 19. Datos de humedad, volumen húmedo y flujo del aire para cada corrida en la torre de pared húmeda.	152
Cuadro 20. Flux de agua transferido y coeficiente de transferencia de masa medido para cada corrida de la torre de pared húmeda.	153
Cuadro 21. Datos generales para la determinación de la correlación para la torre de pared húmeda.	154
Cuadro 22. Datos para la determinación de la correlación para la torre de pared húmeda.	155
Cuadro 23. Datos de calibración del sensor de oxígeno disuelto.	155
Cuadro 24. Datos obtenidos del coeficiente de transferencia de masa corregido y sin corregir por la constante de rezago del sensor.	156
Cuadro 25. Parámetros de ajuste para la correlación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en tanque agitado.	156
Cuadro 26. Residuos para el ajuste del modelo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en tanque agitado.	157
Cuadro 27. Datos de presión de saturación y humedad para la corriente de aire.	157
Cuadro 28. Datos de la corriente gaseosa en la operación de la torre de enfriamiento...	158
Cuadro 29. Datos para la curva de operación en cada corrida.	158
Cuadro 30. Datos de la curva de equilibrio.	158
Cuadro 31. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 1.	159
Cuadro 32. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 2.	159
Cuadro 33. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 3.	160
Cuadro 34. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 4.	160

Cuadro 35. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa para cada corrida en la torre de enfriamiento.	160
Cuadro 36. Datos para la determinación de la correlación para el coeficiente volumétrico de transferencia de masa.	161
Cuadro 37. Parámetros de ajuste para la correlación para el coeficiente volumétrico de transferencia de masa.	161

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de la distribución de flujo en la torre de pared húmeda y del volumen de control (Elaboración propia).....	3
Figura 2. Torre de pared húmeda.....	21
Figura 3. Detalle del depósito superior de la torre de pared húmeda.....	22
Figura 4. Detalle del depósito inferior de la torre de pared húmeda.	23
Figura 5. Depósito de agua de la torre de pared húmeda.	24
Figura 6. Tablero de la torre de pared húmeda donde se encuentran la llave de paso y el rotámetro del aire, así como la pantalla del Arduino.....	25
Figura 7. Esquema del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Gunt (Gunt, 2018).	29
Figura 8. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Gunt (Gunt, 2018).....	30
Figura 9. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Edibon (Edibon, 2018).....	31
Figura 10. Esquema del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).....	33
Figura 11. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).....	32
Figura 12. Detalle del depósito inferior del módulo de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).....	33
Figura 13. Depósito de agua de la torre de enfriamiento de tiro inducido.	34
Figura 14. Torre de enfriamiento de tiro inducido.....	35
Figura 15. Detalle de las rejillas de la torre de enfriamiento de tiro inducido.	36
Figura 16. Ventilador de la torre de enfriamiento de tiro inducido.....	36
Figura 17. Eliminadores de arrastre.	37
Figura 18. Serpentín que utilizó la torre de enfriamiento de tiro inducido.	38
Figura 19. Bomba de la torre de enfriamiento de tiro inducido.	38

Figura 20. Paleta anti derrame.	39
Figura 21. Detalle de la colocación de las paletas antiderrame.	39
Figura 22. Módulo de torre de enfriamiento del fabricante Armfield (Armfield, 2018).	42
Figura 23. Detalle del relleno de la torre de enfriamiento del fabricante Armfield (Armfield, 2018).	43
Figura 24. Detalle de la columna (Edibon, 2018).	43
Figura 25. Módulo de torre de enfriamiento del fabricante Edibon (Edibon, 2018).	44
Figura 26. Módulo de tanque agitado con aireación en su estado inicial del Laboratorio de Ingeniería Química.	44
Figura 27. Detalle del motor.	45
Figura 28. Esquema del arreglo de tuberías del tanque agitado con aireación (Elaboración propia).	46
Figura 29. Detalle de la superficie de trabajo.	47
Figura 30. Detalle del tanque (A) y de la parte trasera del módulo (B).	48
Figura 31. Esquema del módulo de tanque agitado con aireación del fabricante Edibon (Edibon, 2018).	50
Figura 32. Diagrama del módulo de tanque agitado con aireación del fabricante Edibon (Edibon, 2018).	51
Figura 33. Difusor de gas de acero inoxidable (Ticobirra, 2019).	68
Figura 34. Diagrama de la columna principal (Medidas en centímetros, elaboración propia).	76
Figura 35. Diagrama del depósito superior (Elaboración propia).	81
Figura 36. Diagrama del depósito inferior (Elaboración propia).	82
Figura 37. Interior del equipo central de medición de datos.	83
Figura 38. Diagrama del retorno de agua al tanque (Elaboración propia).	85
Figura 39. Retorno de agua al tanque.	86
Figura 40. Tanque previo a las modificaciones.	87
Figura 41. Vista frontal del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia).	91

Figura 42. Detalle de la vista superior de la conexión por brida (Medidas en centímetros, elaboración propia).....	92
Figura 43. Vista superior de la base para la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).....	92
Figura 44. Vista lateral de la base para la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).....	93
Figura 45. Ilustración de la base para la torre de enfriamiento (Elaboración propia).	93
Figura 46. Diagrama de un aspersor de cuatro ramas (Elaboración propia).	98
Figura 47. Distribución del rociador sobre el área de rejillas de la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).	99
Figura 48. Rociador una vez colocado en la torre de enfriamiento.	101
Figura 49. Vista lateral del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia).	104
Figura 50. Detalle de la tapa del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia). ..	105
Figura 51. Vista lateral de la introducción de la tubería de aire al tanque y su sujeción a la tapa (Elaboración propia).	105
Figura 52. Diagrama del burbujeador en forma de anillo (Medidas en centímetros, elaboración propia).....	108
Figura 53. Diagrama de la introducción de la tubería de aire al tanque y colocación del burbujeador (Elaboración propia).	109
Figura 54. Diagrama de tuberías del módulo de tanque agitado (Medidas en centímetros, elaboración propia).....	111
Figura 55. Diseño del agitador de disco (Medidas en centímetros, elaboración propia). ..	112
Figura 56. Variación del coeficiente de transferencia de masa respecto al flujo de aire. ..	115
Figura 57. Coeficiente de transferencia de masa predicho respecto al medido.	116
Figura 58. Coeficiente de transferencia de masa predichos respecto a los residuos.	116
Figura 59. Dependencia de los residuos respecto al orden de medición.	117
Figura 60. Rebalse de agua en la entrada a la columna.	117
Figura 61. Sección superior del módulo de torre de pared húmeda.	118

Figura 62. Depósito superior del módulo de torre de pared húmeda.	118
Figura 63. Determinación de la constante de rezago del sensor de oxígeno disuelto.	120
Figura 64. Variación del coeficiente de transferencia de masa respecto al flujo de aire alimentado.	121
Figura 65. Coeficientes de transferencia de masa medidos, respecto al modelo, para el tanque agitado.	123
Figura 66. Residuos de la correlación para el experimento de tanque agitado.	123
Figura 67. Burbujeo uniforme en cada agujero.	124
Figura 68. Ausencia de vórtice a una velocidad de agitación de 1200 revoluciones por minuto.	124
Figura 69. Curvas de operación para cada corrida a distintos flujos de agua, y un flujo de aire de 0.105 kg/s.	125
Figura 70. Datos medidos contra los predichos por el modelo de Kelly y Swenson.	127
Figura 71. Residuos de la correlación de Kelly y Swenson.	128
Figura 72. Datos medidos contra los predichos por el modelo de Kloopers y Kroger.	129
Figura 73. Residuos respecto a los datos predichos por el modelo de Kloopers y Kroger.	129
Figura 74. Rociador de la torre de enfriamiento en funcionamiento.	130
Figura 75. Muestra de cálculo de la constante de rezago del sensor.	166
Figura 76. Volumen de control diferencial para una torre de flujo cruzado.	200

Capítulo 1

Introducción

La experimentación y el trabajo en el laboratorio son parte esencial del aprendizaje de un estudiante de ingeniería química, ya que es ahí donde se ponen en práctica los conocimientos teóricos adquiridos mediante simulaciones a nivel de laboratorio, se visualizan y asimilan los fenómenos físicos estudiados, y se adquieren destrezas prácticas en el manejo de equipos usados para llevar a cabo procesos y operaciones unitarias.

El Laboratorio de Ingeniería Química contaba con equipos que, aunque mostraban un desempeño aceptable, se les podía realizar acciones variadas que mejoraran su rendimiento, de manera que permitieran al estudiante obtener un mayor provecho del conocimiento adquirido en las prácticas de laboratorio; tales equipos son la torre de enfriamiento, el tanque agitado con aireación y la torre de pared húmeda.

Dichas oportunidades de mejora pueden ser variadas, tales como la automatización de la toma de datos, modificación de las condiciones de operación para que estas se adapten en mayor medida al modelo teórico, reducción en la cantidad de sustancias utilizadas y corrección de fugas. Por citar ejemplos, el tanque agitado con aireación presentaba el principal inconveniente en la toma de datos, ya que se realizaba mediante captura de video de la pantalla del sensor de oxígeno disuelto, mediante el teléfono celular de un estudiante y la torre de enfriamiento presentaba grandes fugas en su operación.

Un ingeniero químico tiene los conocimientos necesarios en transferencia de masa, de fluidos y de calor, así como en funcionamiento y operación de equipos, para llevar a cabo el diseño y puesta en marcha de las acciones necesarias para mejorar el rendimiento de estos, así como de facilitar y hacer más práctica su operación. Por esta razón se planteó como Práctica Dirigida de Graduación, la propuesta e implementación de dichas mejoras, así como la confección de las guías de uso adecuado de los equipos mencionados, una vez se llevaran

a cabo dichas acciones.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Torre de pared húmeda

La torre de pared húmeda es un equipo que consiste en un tubo donde se introduce en su parte inferior una corriente de gas ascendente y en su parte superior una corriente líquida que se distribuye uniformemente sobre toda la superficie interior del tubo, formando una película delgada descendente. En este contacto de fases a contracorriente tiene lugar la transferencia de masa ya sea porque se opere de forma que un soluto presente en la fase gaseosa se disuelve en la fase líquida, o porque se opere de forma que parte de la fase líquida se evapora siendo arrastrada por la fase gaseosa.

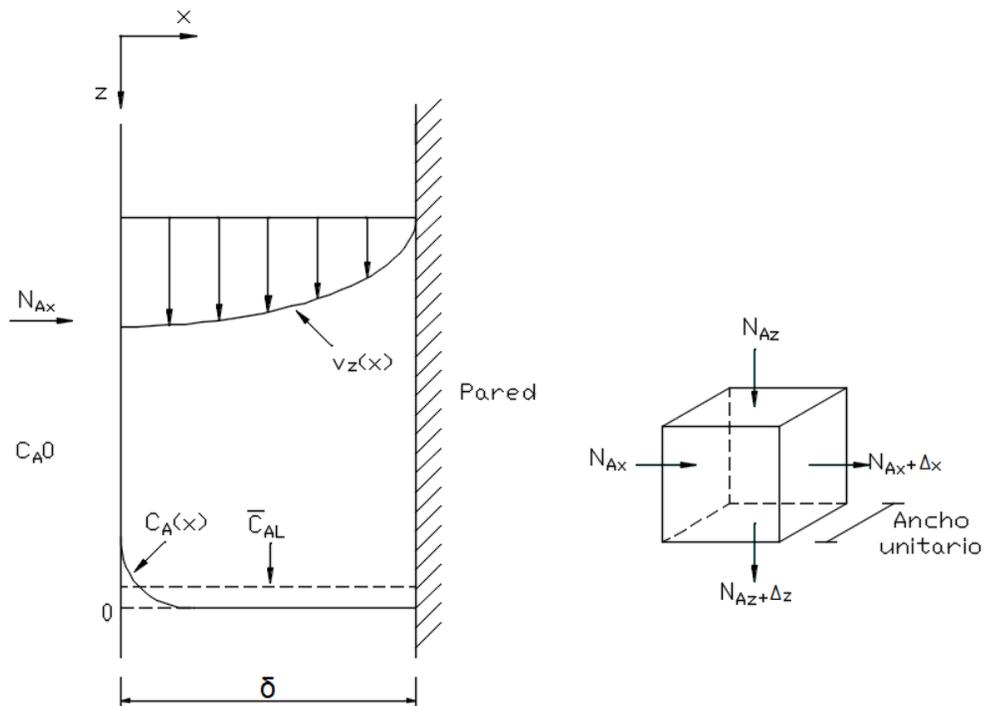


Figura 1. Diagrama de la distribución de flujo en la torre de pared húmeda y del volumen de control (Elaboración propia).

El principal uso de este equipo tiene lugar en el campo investigativo por dos razones, el experimento se puede llevar a cabo fácilmente en estado estacionario, y la razón más importante es porque el área de transferencia de masa se puede medir con precisión, lo que permite el cálculo del coeficiente de transferencia de masa (Welty, Wicks, Wilson y Rorrer, 2007).

La torre de pared húmeda es un equipo en el que se tiene simultáneamente transferencia de masa y de cantidad de movimiento (Geankoplis, 2006). Realizando un balance de cantidad de movimiento se tiene la Ecuación (1)

$$\mu \frac{d^2 z}{dx^2} + \rho \cdot g = 0 \quad (1)$$

De donde se obtiene el grosor de la película líquida descendente, la cual tiene un grosor de

$$\delta = \left(\frac{3 \cdot \dot{V} \cdot \mu}{\pi \cdot D \cdot \rho \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Se obtiene también el perfil de velocidad del líquido dentro de la película, el cual es parabólico respecto a su eje radial, representado por

$$v_z = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu} \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

donde

δ : Grosor de la película, m

\dot{V} : Flujo volumétrico del líquido, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

μ : Viscosidad del líquido, Pa s

D : Diámetro interno del tubo, m

ρ : Densidad del líquido, kg m^{-3}

x : Dirección perpendicular al flujo, m

z : Dirección paralela al flujo, m

g : Aceleración de la gravedad, m s^{-2}

v_z : Velocidad en la dirección del flujo, $m s^{-1}$

Sabiendo que la velocidad máxima del líquido se obtiene en el borde de la película, es decir, cuando $x = \delta$, se obtiene la expresión

$$v_{z \max} = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu} \quad (4)$$

y

$$v_{z \max} = \frac{3}{2} v_{z \text{ prom}} \quad (5)$$

donde

$v_{z \max}$: Velocidad máxima en la dirección del flujo, $m s^{-1}$

$v_{z \text{ prom}}$: Velocidad promedio en la dirección del flujo, $m s^{-1}$

2.1.1. Absorción de un soluto en una corriente gaseosa

Si la torre de pared húmeda se opera de forma en que un soluto presente en la corriente gaseosa se absorbe en la corriente líquida, se puede realizar un balance de masa de un soluto A que se absorbe, sobre un volumen de control diferencial de la forma

$$v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} - D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

donde

C_A : Concentración del soluto A, $mol m^{-3}$

D_{AB} : Difusividad del soluto A en la sustancia B, $m^2 s^{-1}$

Si se combina la Ecuación (6) con la Ecuación (3) del perfil de velocidad resulta

$$v_{z \max} \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right] \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (7)$$

Esta ecuación ya ha sido resuelta (Johnstone y Pigford, 1942) y tiene la forma

$$\frac{C_{Ai} - C_{AL}}{C_{Ai} - C_{A0}} = 0.7857 \cdot e^{-5.1213 \cdot n} + 0.1001 \cdot e^{-39.318 \cdot n} + 0.03599 \cdot e^{-105.64 \cdot n} + \dots \quad (8)$$

con

$$n = \frac{2 \cdot D_{AB} \cdot L}{3 \cdot \delta^2 \cdot v_{z \text{ prom}}} \quad (9)$$

donde

L : Altura de la torre, m

C_{AL} : Concentración de A en el fondo de la torre, mol m⁻³

C_{A0} : Concentración de A en el tope de la torre, mol m⁻³

C_{Ai} : Concentración de A en la interfaz, mol m⁻³

Para una distancia dy , la rapidez de absorción de soluto está representada por la Ecuación (10)

$$v_{z \text{ prom}} \cdot \delta \cdot d\bar{C}_A = k_L \cdot (C_{Ai} - \bar{C}_A) dy \quad (10)$$

Con lo que por integración se define el coeficiente de transferencia promedio

$$K_L = \frac{v_{z \text{ prom}} \cdot \delta}{L} \cdot \ln \left(\frac{C_{Ai} - C_{A0}}{C_{Ai} - C_{AL}} \right) \quad (11)$$

donde

K_L : Coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida, mol m⁻² s⁻¹

Para una película delgada, el número de Reynolds se define como

$$Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (12)$$

donde

Γ : Flujo de masa de líquido por unidad de espesor de la película, kg s⁻¹ m⁻¹

Cuando se tienen velocidades de flujo bajas o tiempos de contacto con el gas elevados, lo que generalmente ocurre para números de Reynolds menores a 100, se ha demostrado que basta con utilizar el primer término de la serie de la Ecuación (8), por lo que, al evaluar la Ecuación (11) da el resultado

$$K_L = \frac{v_{z\text{prom}} \cdot \delta}{L} \cdot \ln\left(\frac{e^{5.1213 \cdot n}}{0.7857}\right) = 3.41 \frac{D_{AB}}{\delta} \quad (13)$$

lo que reescrito de otra forma

$$3.41 \approx \frac{K_L \cdot \delta}{Diff_{AB}} = Sh \quad (14)$$

Donde Sh representa al número de Sherwood. Por otra parte, si más bien se analiza para tiempos de contacto cortos o flujos grandes, es decir números de Reynolds elevados, se tienen las relaciones

$$K_L = \left(\frac{6 \cdot Diff_{AB} \cdot \Gamma}{\pi \cdot \rho \cdot \delta \cdot L}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

y

$$Sh = \left(\frac{3}{2\pi} \cdot \frac{\delta}{L} \cdot Re \cdot Sc\right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Según Treybal (1980), los valores de K_L obtenidos experimentalmente pueden resultar considerablemente mayores que los calculados debido a ondulaciones formadas en la película líquida para valores de Re mayores a 25, las cuales no están consideradas dentro del modelo.

2.1.2. Difusión de vapor en la corriente gaseosa

Por otra parte, si la torre se opera de manera en que se da la evaporación de parte de la corriente líquida hacia la gaseosa, se tiene como fuerza motriz la media logarítmica (LM) de

la diferencia de fracciones molares del líquido en el gas entre la interface y el seno del gas, es decir

$$(y_i - y_G)_{LM} \quad (17)$$

donde

y_i : Fracción molar en la interfaz, adim

y_G : Fracción molar en el seno del líquido, adim

La masa de líquido transferida al gas se puede determinar con precisión al medir la diferencia entre el flujo alimentado y el obtenido, o en el caso del sistema aire-agua, midiendo la humedad a la entrada y salida de la torre. Esto permite calcular el coeficiente de transferencia de masa directamente de la definición, por medio de la Ecuación (18)

$$K_y = \frac{N_A}{(y_i - y_G)_{LM}} \quad (18)$$

donde

N_A : Flux de transferencia de la sustancia A, mol m⁻² s⁻¹

$(y_i - y_G)_{LM}$: Media logarítmica de fracciones molares, adim

2.2. Torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son equipos destinados a disminuir la temperatura de un líquido, generalmente agua, por medio del contacto con un gas no saturado con el vapor del líquido en cuestión; el gas más común es el aire. Se trata de columnas en las que en su interior poseen rellenos destinados a proveer un buen contacto gas-líquido con una muy baja caída de presión, la corriente de gas se obtiene por medio de ventiladores y a la salida de este se colocan rejillas inclinadas y eliminadores de arrastre con el fin de evitar que pequeñas gotas de líquido abandonen el equipo junto con la corriente gaseosa. El uso más importante que

se le da a este tipo de equipo corresponde a la reducción de la temperatura del agua que se recircula a intercambiadores de calor (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Según la posición del ventilador, las torres de enfriamiento se pueden clasificar en tres tipos:

- De tiro forzado: El ventilador se encuentra colocado en la entrada del gas e impulsa el gas a lo largo de la columna.
- De tiro inducido: El ventilador extractor se encuentra a la salida del gas e induce una corriente de entrada en el equipo.
- De flujo cruzado: El ventilador se encuentra en el lateral del equipo y la dirección de los flujos de gas y líquido son perpendiculares.

En una torre de enfriamiento, la disminución de la temperatura del líquido se da en su mayor parte por la evaporación de este, y en menor medida por la pérdida de calor sensible del líquido en caso de que el gas se encuentre a una menor temperatura. Sin embargo, aunque el gas se encuentre a una mayor temperatura que el líquido, aún es posible producir un enfriamiento, siempre y cuando la temperatura de bulbo húmedo del gas sea menor que la temperatura del líquido (McCabe et al., 2007).

2.2.1. Humedad absoluta del aire

La humedad absoluta de una mezcla de aire y vapor de agua según Geankoplis (2006) se define como los kilogramos de agua presentes en un kilogramo de aire seco. De acuerdo a esta definición, la humedad absoluta sólo es dependiente de la presión parcial del agua y de la presión total del sistema.

2.2.2. Humedad relativa del aire

El porcentaje de humedad relativa es una medida de la cantidad de saturación de una mezcla de aire y vapor de agua para unas condiciones dadas de temperatura y presión (Geankoplis, 2006).

2.2.3. Temperatura de bulbo húmedo

Cuando una pequeña masa de líquido está expuesta a un flujo de gas no saturado, parte del líquido se evapora y la energía necesaria para esta vaporización proviene de la masa del líquido, lo que provoca una reducción de temperatura en este. Al encontrarse el líquido a una temperatura menor que el gas, comienza a existir un flujo de calor sensible desde el gas hacia el líquido hasta el punto en que la totalidad de la energía necesaria para la evaporación del líquido, proviene en su totalidad del gas. La temperatura a la cual se alcanza este estado es conocida como temperatura de bulbo húmedo y corresponde a un estado estacionario dinámico, no a un estado de equilibrio. La fuerza impulsora para la transferencia de masa y energía, en este caso las diferencias de concentración y temperatura, son fácilmente predecibles con la temperatura de bulbo húmedo (McCabe et al., 2007).

2.2.4. Análisis de la torre de enfriamiento

Para el sistema agua-aire, conforme el agua recorre la torre disminuye su temperatura a lo largo de esta, así también la del aire aumenta. Para que exista enfriamiento del agua, en todo momento la temperatura de esta debe ser mayor que la de bulbo húmedo, en caso contrario la energía necesaria para la evaporación proviene enteramente del aire (McCabe et al., 2007). Si se hace un balance de energía para una pequeña sección de la torre se tiene la Ecuación (19). En esta, el subíndice "2" representa la parte superior de la torre, mientras que "1" la inferior, "w" el agua y "a" el aire.

$$G' dH_a = d(L' H_w) \quad (19)$$

Lo anterior haciendo la simplificación de que el flujo de líquido es constante, ya que las pérdidas por evaporación comprenden entre el 1% y el 2% (McCabe et al., 2007).

Donde

G' : Flujo másico de gas libre de vapor por unidad de área transversal, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$

L' : Flujo másico de líquido por unidad de área transversal, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$

H_a : Entalpía del gas, J

H_w : Entalpía del líquido, J

$$G' dH_a = L' \cdot C_{p w} \cdot dT_w \quad (20)$$

donde

T_x : Temperatura del líquido, °C

C_{pL} : Capacidad calorífica del líquido, J kg⁻¹ °C⁻¹

Lo anterior tomando en cuenta que la variación en la entalpía del gas es el resultado de dos factores, la variación en el calor sensible, así como la variación de la humedad multiplicada por el calor de vaporización

$$dH_a = C_s \cdot dT_a + \lambda_0 \cdot dY \quad (21)$$

donde

λ_0 : Calor latente de vaporización, J kg⁻¹

Y : Humedad absoluta, kg agua kg⁻¹ aire seco

Entonces, el balance global para la torre resulta de la manera

$$G'(H_2 - H_1) = L' \cdot C_{p w} \cdot (T_{w 2} - T_{w 1}) \quad (22)$$

Mientras que para cualquier punto intermedio es

$$G'(H_2 - H_1) = L' \cdot C_{p w} \cdot (T_{w 2} - T_{w 1}) \quad (23)$$

Lo que proporciona una curva de operación para la torre en forma de la entalpía del gas contra la temperatura del líquido. Adicionalmente una curva de equilibrio es proporcionada mediante la ecuación de la entalpía del gas saturado con agua respecto a la temperatura

$$H_a^{sat} = C_s \cdot (T_a - T_0) + \lambda_0 \cdot Y^{sat} \quad (24)$$

Se puede realizar un diagrama de líneas de operación-equilibrio para averiguar la altura total de una torre mediante

$$\frac{H_i - H_a}{T_i - T_w} = \frac{-h_y a}{k_y a \cdot M_a} \quad (25)$$

Ya que los puntos (H_i, T_i) y (H_y, T_x) están unidos mediante rectas de pendientes $\frac{-h_x a}{k_y a \cdot M_b}$ por lo que la integración de estos puntos permitiría averiguar la altura total de empaque mediante la fórmula

$$\int \frac{dH_a}{H_i - H_a} = \frac{k_y a \cdot M_a \cdot Z}{G'} \quad (26)$$

Sin embargo, por simplicidad se prefiere trabajar con un coeficiente global y con una fuerza impulsora de entalpía global

$$G' dH_y = K_y a \cdot (H_y^* - H_y) \cdot dZ \quad (27)$$

Con

$$\int \frac{dH_y}{H_y^* - H_y} = N_{toG} = \frac{Z_T}{H_{Oy}} \quad (28)$$

Siendo

$$H_{toG} = \frac{G'}{K_y a} \quad (29)$$

Donde

H_{toG} : Altura de una unidad de transferencia, m

N_{toG} : Número de unidades de transferencia, adim

Z : Altura total de relleno, m

$K_y a$: Coeficiente volumétrico global de transferencia de masa en la fase gaseosa, $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$

M_b : Masa molar del aire, kmol kg^{-1}

2.3. Tanque agitado con aireación

El propósito de un tanque burbujeador es poner en contacto una fase líquida con una gaseosa con el fin de llevar a cabo la transferencia de masa. Este equipo no es adecuado cuando es requerido el efecto de contracorriente, sin embargo, es bastante útil para diversos procesos. Entre estos se encuentra el de aireación, útil para el tratamiento de aguas residuales o para proveer el oxígeno necesario en procesos de fermentación aeróbica. Comúnmente, consiste en un tanque con un impulsor para proveer la agitación, preferiblemente de fondo redondo para evitar las zonas con ausencia de corrientes, provisto de un dispositivo en el fondo por donde se burbujea el aire. Este dispositivo se encuentra por debajo del impulsor y dependiendo del tamaño del tanque, puede ser simplemente un extremo abierto de tubería, sin embargo, se prefiere una tubería circular en forma de anillo, de preferencia con un diámetro igual o más pequeño que el impulsor, perforada en su parte superior, en donde la separación entre orificios no debe ser menor que el diámetro de dicho orificio (Treybal, 1980; Welty et al., 2007).

Según Treybal (1980), está demostrado que la resistencia a la transferencia de masa en una operación de este tipo está gobernada por la fase líquida. La agitación mejora la transferencia debido a que promueve el contacto entre las fases líquida y gaseosa, al distribuir las burbujas por todo el tanque y evitar la coalescencia, lo que disminuiría el área de transferencia. Debido a las múltiples colisiones de las burbujas y a la misma agitación mecánica, resulta imposible medir el área de transferencia, por lo que se prefiere utilizar coeficientes volumétricos de transferencia de masa ($K_L a$). El parámetro " a " se define como el área disponible para la transferencia por unidad de volumen del equipo. Como no se puede calcular un flux N_A directamente, se calcula una tasa total de transferencia en la interfaz.

Si se realiza un balance de masa en la fase líquida para el oxígeno (soluto A) en un proceso por lotes, es decir, un proceso sin entradas ni salidas de líquido, resulta:

$$\frac{d(C_A \cdot V)}{dt} = K_L a \cdot V \cdot (C_A^* - C_A) \quad (30)$$

donde

C_A : Concentración del soluto A, mol L⁻¹

C_A^* : Concentración en el equilibrio del soluto A, mol L⁻¹

V : Volumen total, m³

$K_L a$: Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, s⁻¹

t : Tiempo, s

En el balance se supone que no hay absorción de oxígeno por reacción química. Además, si el volumen total permanece constante

$$\frac{dC_A}{dt} = K_L a \cdot (C_A^* - C_A) \quad (31)$$

integrando y sabiendo que

$$t = 0 \quad \Rightarrow \quad C_A = 0 \quad (32)$$

se obtiene

$$C_A(t) = C_A^* \cdot (1 - e^{-K_L a \cdot t}) \quad (33)$$

Diversos son los métodos utilizados para calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Uno de los más comunes es la evacuación de gases, en la cual se reduce la concentración de oxígeno disuelto para luego comenzar a airear el líquido. Entonces, se lleva un monitoreo continuo de la concentración de oxígeno respecto al tiempo, datos que se grafican para obtener una curva creciente con pendiente cada vez menor, debido a que la velocidad de transferencia de oxígeno decrece con la reducción de la fuerza motriz ($C_A^* - C_A$).

Uno de los métodos físicos para evacuar el oxígeno de la fase líquida al inicio del experimento consiste en bombear nitrógeno hasta que el sensor de oxígeno disuelto otorgue una medición de cero. Hecho esto, se procede a airear el agua y graficar la

concentración de oxígeno respecto al tiempo, obteniendo una curva que tiene la forma descrita por la Ecuación (33). Otro método implica el uso de microorganismos, en este, se tiene una masa o concentración definida de microorganismos en un recipiente en el que se detuvo la entrada de aire. La concentración de oxígeno disuelto se empezará a reducir de una manera equivalente a la respiración de estos microorganismos, y al graficar este fenómeno respecto al tiempo, se obtiene de la pendiente de dicha gráfica el valor de la transferencia de consumo de oxígeno. Al iniciar de nuevo la aireación, la concentración de oxígeno incrementará hasta el estado estable, y conociendo ya el valor de la transferencia de consumo de oxígeno, se puede calcular el coeficiente de transferencia de masa (García y Gómez, 2009).

Por otra parte, también se tienen métodos químicos para eliminar el oxígeno disuelto y para determinar el coeficiente de transferencia de masa. El método de oxidación de sulfito consiste en agregar esta sustancia al tanque donde se realizará el experimento a una concentración tal que la velocidad de reacción con el oxígeno disuelto para formar sulfato es tan rápida, que se puede considerar una concentración inicial de oxígeno disuelto de cero. Para esto es necesario el uso de un catalizador, principalmente iones de cobre o cobalto. Posteriormente se comienza la aireación para que el oxígeno entrante reaccione con el sulfito en disolución, la velocidad de la reacción de oxidación es mucho mayor que la tasa de transferencia de masa, por lo que se puede suponer que el proceso está controlado por dicha transferencia. A distintos intervalos se detiene la entrada de aire y se toman alícuotas para determinar la concentración del sulfito residual en ese instante, datos con los que posteriormente se grafica el perfil de disminución de dicha concentración y con esto se calcula el coeficiente de transferencia de masa (García y Gómez, 2009).

Según García y Gómez (2009) los métodos químicos fueron los primeros en utilizarse, sin embargo, presentan varias desventajas, principalmente por el cambio de las propiedades fisicoquímicas del líquido. Esto no los hace aptos para utilizarse en todo tipo de aplicaciones, principalmente cuando se utilizan microorganismos, ya que las condiciones del experimento de determinación del coeficiente de transferencia de masa y el proceso real

difieren en gran medida. Por esta razón, en la actualidad se prefieren los métodos físicos, así como por su facilidad de aplicación.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el método físico, en general, requiere el uso de un sensor de oxígeno disuelto de membrana. Este posee un retraso entre el valor real y el medido, debido a que para otorgar una medición, se debe dar la difusión del soluto a través de la membrana del sensor y finalmente dentro de la probeta para cambiar su concentración interna y obtener una medición. El tiempo característico de respuesta del sensor se define como el tiempo en el que el sensor alcanza un 63.3 % del valor final al pasar de la completa desoxigenación hasta el punto de saturación de oxígeno de la solución. Si el tiempo característico de retraso del sensor es del mismo orden que el tiempo característico de transferencia de masa $\frac{1}{K_L a}$, se debe realizar una corrección a los datos para obtener resultados precisos.

Este retraso en el cambio de concentración de oxígeno dentro de la probeta se puede describir por una dinámica de primer orden de la forma

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{(C_A^* - C_p)}{\tau_p} \quad (34)$$

donde

C_p : Valor de concentración mostrada por el sensor, mol L⁻¹

τ_p : Tiempo característico de respuesta del sensor, s

Aunque se prefiere describir en términos de una constante de rezago del sensor, la cual es el inverso del tiempo de respuesta del sensor, de la siguiente manera

$$\frac{dC_p}{dt} = k_p \cdot (C_A^* - C_p) \quad (35)$$

k_p : Constante de rezago del sensor, s⁻¹

de donde se obtiene

$$C_p = C_A^* \cdot (1 - e^{-k_p \cdot t}) \quad (36)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se tiene una forma de calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de masa tomando en cuenta el retraso del sensor, ecuación que tiene la forma

$$C_p = C_A^* \cdot \left(1 + \frac{K_L a}{k_p - K_L a} e^{-k_p \cdot t} - \frac{k_p}{k_p - K_L a} e^{-K_L a \cdot t} \right) \quad (37)$$

Capítulo 3

Metodología

Para la realización de la Práctica Dirigida, se siguió el esquema de trabajo que se describirá a continuación:

3.1. Investigación

Se realizó una investigación bibliográfica acerca de temas relacionados con los equipos en cuestión; torre de enfriamiento, tanque agitado con aireación y torre de pared húmeda. Estos temas abarcaron principios de funcionamiento, modelos matemáticos, principales usos industriales. Su objetivo es el estudio de dichos equipos a profundidad, para así conocer el trasfondo de estos y poder trabajar de una manera objetiva y sustentada.

3.2. Descripción del estado inicial de los equipos

Antes de proponer mejoras o realizar acciones sobre los equipos en cuestión, fue necesario la descripción del estado inicial de estos. Por medio de visitas al laboratorio y revisión de reportes de prácticas de laboratorio, se conoció el equipo, partes que lo conforman, método de operación y valor de los parámetros utilizados en las prácticas, tales como temperatura y flujos de trabajo.

3.3. Selección de las mejoras

Inicialmente se llevó a cabo encuestas y entrevistas a profesores y estudiantes con el fin de recopilar información para la confección de una matriz de selección de mejoras. Ya que la información recolectada no fue concluyente, se decidió cambiar la herramienta de selección de las mejoras.

Se elaboró una lista de mejoras con su respectivo fundamento técnico, la cual fue discutida en reunión con el profesor director de la Práctica Dirigida de Graduación y los dos

profesores lectores para seleccionar de una manera objetiva las mejoras que se llevarían a cabo.

3.4. Diseño conceptual

Una vez seleccionadas las mejoras, se procedió al diseño conceptual de estas. Con base en criterios técnicos, costos y otras consideraciones se confeccionó el diseño conceptual de las distintas partes del equipo.

3.5. Construcción de las mejoras

Basándose en el diseño planteado se inició la implementación de las acciones de mejora y la construcción de las partes del equipo necesarias. En ocasiones, debido a limitaciones en el proceso constructivo, o a problemas observados en la operación final del equipo, fue necesario la modificación del diseño original o inclusive, la completa cancelación de la implementación de alguna acción de mejora.

3.6. Evaluación de las mejoras y los equipos

Una vez terminados los procesos constructivos y de modificación de los equipos, se operaron estos bajo las condiciones planteadas para corroborar que el equipo trabajara adecuadamente. En los casos en que se observó un problema en su operación, se procedió a corregirlos de acuerdo con el diseño, o se cambió el diseño bajo criterio técnico.

3.7. Redacción de los manuales de equipo y laboratorio

Con base en la experiencia generada en el proceso de diseño y construcción, se confeccionaron los manuales de equipo correspondientes donde se explicó el funcionamiento y método de operación de estos, como por ejemplo arranque, condiciones de operación, mantenimiento necesario, calibración, medidas de seguridad y cuidados que se deben tener con el equipo. Además, se confeccionó también las guías necesarias para la realización de las prácticas de laboratorio con el equipo en cuestión.

Capítulo 4

Descripción del estado inicial de los equipos

Antes de proponer mejoras o realizar acciones sobre los equipos, resultaban de interés distintas interrogantes tales como:

- ¿Cuál era el estado inicial de los equipos?
- ¿Bajo qué condiciones se encontraban operando?
- ¿Cómo están compuestos y bajo qué condiciones operan módulos similares de fabricantes reconocidos?

Para responder a estas preguntas y saber cómo se encontraban en su momento estos equipos, se realizó visitas al laboratorio en las que se operaron los equipos bajo las condiciones normales, se asistió a las prácticas de laboratorio donde se observó a los estudiantes en la realización de estas, además, se consultó los manuales del equipo. Se revisaron módulos comerciales similares de fabricantes reconocidos, tales como Gunt, Edibon y Armfield. Con esta información se obtuvo la siguiente descripción, que serviría más tarde para proponer acciones de mejora de acuerdo con necesidades o errores observados.

4.1. Torre de pared húmeda

4.1.1. Descripción del equipo

La torre de pared húmeda se opera de manera que se da la transferencia de masa de un líquido puro hacia un gas, particularmente agua y aire; es decir, se da la evaporación de parte de la película de agua, la cual pasa a formar parte de la humedad de la corriente de aire (humidificación). Para esto, se ponen en contacto los dos flujos a contracorriente por lo que la corriente de aire ingresa por la parte inferior de manera ascendente. Una imagen del equipo se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Torre de pared húmeda.

Este equipo está compuesto por:

Columna principal: Es aquí donde se pone en contacto ambas fases a contracorriente. Consiste de un tubo de vidrio de 0.028 m de diámetro interno y 1.10 m de longitud de transferencia de masa. Su extremo inferior tiene forma de campana con el fin de desviar el flujo de agua y evitar que este caiga dentro de la columna secundaria inferior, la cual se encuentra justo debajo. En su extremo superior tiene adherido el depósito superior. Se encuentra totalmente fija y no es desmontable. Se observó en su interior suciedad adherida e imperfecciones del tubo que dificultan la obtención de una película de agua estable.

Columna secundaria inferior: Consiste en un tubo de vidrio de 0.028 m de diámetro interno y 1.10 m de longitud. Su función es la de estabilizar la corriente de aire para eliminar los efectos de entrada. Su extremo superior está colocado dentro de la campana de la columna principal, justo debajo de la zona de transferencia de masa. En su extremo inferior tiene adherido un tapón de PVC, por el cual, mediante un agujero se introduce el aire. Se encuentra totalmente fija y no es desmontable.

Columna secundaria superior: Consiste en un tubo de vidrio 0.04 m de diámetro interno y 0.7 m de longitud. Está colocada justo a la salida de la columna principal, su función es la de servir para la medición de la humedad del aire de salida, por lo que tiene dentro el sensor para dicha medición. Se encuentra sujeta con gasa plástica al marco del equipo. Por su parte superior se introduce un sensor de humedad.

Depósito superior: Consiste de dos cajas concéntricas de plástico acrílico transparente que tienen como fin estabilizar el flujo de agua entrante y permitir la introducción de este a la columna de manera estable y cubriendo toda el área interna de esta. Las dimensiones de la caja exterior son de 0.18 m por 0.18 m de base y 0.18 m de altura. Dentro de la caja exterior se encuentra el sensor encargado de medir la temperatura del agua de entrada, la cual entra por el fondo de esta.

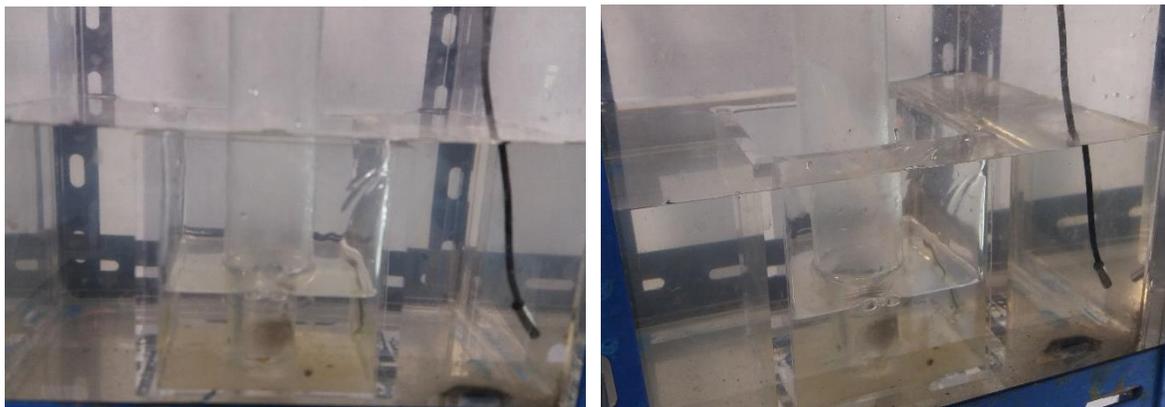


Figura 3. Detalle del depósito superior de la torre de pared húmeda.

Depósito inferior: Se trata de una caja de plástico acrílico de 0.18 m por 0.18 m de base y 0.18 m de altura que cumple con la función de recolectar el agua que sale de la columna principal. Dentro tiene un sensor que mide la temperatura del agua de salida y en su parte inferior tiene un agujero por donde se extrae esta y se lleva nuevamente al depósito de agua de donde se recircula. En su interior no tiene más que dicho agujero y el sensor antes mencionado, además, dentro de esta se encuentra la unión entre la columna principal y la columna secundaria inferior.



Figura 4. Detalle del depósito inferior de la torre de pared húmeda.

Marco: Estructura metálica que sirve de soporte para todas las partes del equipo. Tiene una altura total de 3 m y un ancho de 0.20 m en la sección de la columna, mientras que en la base el ancho es de 0.40 m. Esta estructura se encuentra soportada por patas fijas.

Bomba sumergible: Equipo encargado de llevar el agua desde el depósito de agua hasta el depósito superior. Tiene una capacidad máxima de 7 L/min y para ser operada simplemente debe ser conectada, es decir, no tiene la capacidad de regular el flujo por sí misma, por lo cual, este se regula mediante una válvula a la salida de la bomba.

Depósito de agua: Consiste en una caja plástica independiente al marco del equipo desde donde se bombea el agua hasta el depósito superior. Tiene por dimensiones 0.43 m por 0.30 m de base y 0.26 m de altura total, sin embargo, este con frecuencia se llena hasta los

0.18 m de altura, lo que resulta en un volumen de 23.2 L. Se encuentra ubicado al lateral de la torre y en su interior se encuentra la bomba sumergible.



Figura 5. Depósito de agua de la torre de pared húmeda.

Sistema de medición: El equipo posee sensores de temperatura NTC-3435 en los depósitos de agua superior e inferior para medir esta variable a la entrada y salida de la columna principal respectivamente, sin embargo, dichos sensores no funcionan correctamente, ya que muestran temperaturas medidas correspondientes a los extremos del rango de medición de dichos sensores; por esta razón, la temperatura en estos puntos se mide mediante un termómetro introducido en los depósitos. Además, posee sensores de temperatura humedad relativa del aire DHT11; uno está colocado dentro de la columna secundaria superior, para medir esta variable en el flujo de aire de salida. El otro mide las condiciones de entrada y se encuentra en la tubería de aire que proviene del compresor, antes de entrar al rotámetro, se introduce por una “T” de tubería. Ambos sensores otorgaban medidas erróneas, ya que también mostraban valores extremos de su rango de medición, por lo que esta variable se medía mediante un termo anemómetro portátil. El equipo cuenta también con un medidor de flujo de agua YF-S201. Estos sensores envían los valores medidos a un Arduino, el cual se encuentra fijado en un tablero a una altura de 1.20 m sobre el suelo, y muestra dichos valores en una pantalla.

Rotámetro: Usado para medir el flujo de aire de entrada, tiene un rango de medición de 10 L/min a 100 L/min.



Figura 6. Tablero de la torre de pared húmeda donde se encuentran la llave de paso y el rotámetro del aire, así como la pantalla del Arduino.

4.1.2. Operación del equipo

Ciclo del agua

Una vez conectada la bomba, el agua entra en el equipo pasando primero por el medidor de flujo, el cual está conectado al Arduino por cables ubicados dentro de canaletas colocadas a lo largo del marco. Seguido de esto, el agua asciende por tubería de PVC de 0.023 m ($\frac{1}{2}$ pulgada nominal) hasta la parte inferior de la caja externa del depósito superior. Una vez que el nivel del agua alcanza la altura de la caja interna, esta rebalsa y cae dentro para luego bajar en forma de película. En el extremo inferior de la columna, la película se desvía por la campana de esta y cae al depósito inferior, donde se le mide la temperatura. El agua sale por un agujero en la parte inferior del depósito por una tubería de PVC del mismo diámetro que la de entrada, a la cual se le acopla una manguera en su extremo para llevar el agua nuevamente hasta el reservorio.

Recorrido del aire

El aire se introduce desde la línea de aire comprimido del laboratorio, el cual proviene del compresor, mediante una manguera. Esta conduce a un arreglo de tubería que contiene una llave de paso y la “T” donde se mide la humedad relativa y temperatura de entrada del aire; posee acoples para manguera en sus extremos para su conexión. Luego, mediante manguera, se hace pasar la corriente de aire a través del rotámetro donde se mide el flujo, y seguido de esto, se introduce el aire por la columna secundaria inferior con el fin de estabilizarlo. Al salir de esta, el flujo entra en la columna principal donde ocurre el fenómeno de interés de la práctica, y al abandonar esta, el aire pasa por la columna secundaria superior, donde originalmente se le medía la humedad mediante un sensor conectado al Arduino, sin embargo, como este no funciona, la forma de medir esta variable pasó a ser el colocar el termo anemómetro a la salida de esta columna. Por último, el aire es expulsado a la atmósfera.

4.1.3. Procedimiento de operación

- Para llevar a cabo la operación de dicho equipo primeramente se debe llenar el depósito de agua e introducir la bomba sumergible en este; luego se conecta y se espera hasta que el agua se encuentre descendiendo por la columna principal.
- Hecho esto, se abre la llave de paso del aire que se encuentra en el arreglo de tubería fijado al tablero de madera, y se regula el flujo de aire con el rotámetro; se utilizan valores de flujo de aire escogidos por los estudiantes en todo el rango de medición del rotámetro (10 L/min– 100 L/min). Luego, se debe esperar a alcanzar el estado estacionario para tomar las mediciones.
- Por último, se deben tomar las mediciones para las condiciones de flujo elegidas. Anteriormente se hacía por medio de lectura en la pantalla del Arduino, pero ya que este no se utiliza por las razones antes expuestas, los estudiantes deben tomar las mediciones manualmente por medio de introducción de termómetros corrientes en los depósitos de agua superior e inferior en el caso de la temperatura del agua; y en

el caso de la temperatura y humedad relativa del aire de entrada y salida, se realiza utilizando el termo anemómetro.

- Hecho esto, se varía las condiciones de flujo de aire y se repite el experimento.

4.1.4. Observaciones de la operación

- En su operación se observó que parte del flujo de agua que sale de la columna principal, salpica y cae dentro de la columna secundaria inferior, formando un pozo que burbujea cuando entra el aire por ese extremo. Se observó casos en que hubo una cantidad de agua acumulada tal que representaba un cuarto de la altura de la columna y el burbujeo fue vigoroso. La medición de humedad del aire entrante se realiza antes de introducirse a la columna secundaria inferior. Debido a que el aire burbujea en el pozo mencionado, en este punto puede darse transferencia de masa con la consecuente humidificación del aire, lo que ocasionaría que la humedad del aire medida anteriormente y la humedad real con la que el aire entra en la columna principal sean distintas.
- Dificultad para formar una película laminar estable, debido a que se observó suciedades e imperfecciones dentro de la columna; además, el equipo oscila fácilmente con cualquier perturbación, incluidas las acciones propias de la toma de datos.

4.1.5. Módulos similares de fabricantes reconocidos

Se consultó el módulo de torre de pared húmeda de tres fabricantes reconocidos, Gunt, Edibon y Armfield. Los tres módulos se operan de manera que la transferencia de masa se da por medio de la absorción de oxígeno de la corriente de aire en la película de agua. Es decir, difieren del módulo del laboratorio ya que en este el fenómeno de transferencia de masa se da por medio de la humidificación del aire al evaporarse parte de la película de agua. Los módulos comerciales llevan a cabo la transferencia de un soluto presente en el gas hacia la corriente de agua. Debido a esto, en los tres módulos es necesaria la presencia

de una columna adicional donde se burbujea nitrógeno en la corriente de agua, con el fin de eliminar el oxígeno disuelto en esta y poder recircularla.

Como generalidades, en los tres casos la columna de absorción tiene un diámetro interior de 0.032 m y están fabricadas en vidrio; las columnas de los módulos de Edibon y Armfield miden 0.90 m de longitud mientras que la de Gunt mide 0.89 m. Adicionalmente, en los tres casos la columna de desorción tiene un diámetro interior de 0.026 m y está fabricada en acrílico. En el caso de Gunt y Armfield, esta mide 1.57 m, mientras que la de Edibon 1.40 m. Por otra parte, los tres módulos poseen dos bombas, una que lleva el agua del depósito de agua a la columna de absorción y la otra de esta columna a la de desorción; poseen también un compresor de aire incorporado. Los depósitos de agua superior e inferior de la columna principal son más pequeños que los del módulo del laboratorio, con forma cilíndrica de no más de 0.10 m de diámetro y 0.04 m de altura. El módulo de Gunt no tiene un dispositivo o recámara para estabilizar el aire de entrada a la columna, mientras que el de Armfield tiene una sección fabricada con tubo de aproximadamente 0.05 m de diámetro y 0.10 m de altura.

Detalles específicos

4.1.5.1. Gunt

Las bombas tienen un caudal máximo de 58 L/min y una cabeza hidrostática de 3.7 m. El compresor tiene un caudal máximo de salida de 23 L/min y una presión máxima de 2 bar. Los rangos de medición de los sensores son de 40 mL/min - 360 mL/min para el caudal de agua (rotámetro), 0.34 L/min – 6 L/min para el caudal de aire (rotámetro), 0 °C - 50 °C para la temperatura (2 sensores) y 0 mg/L - 70 mg/L para la concentración de oxígeno (2 sensores). No se especifica la precisión para ninguno de estos sensores. Además, posee un depósito de agua de 50 L.

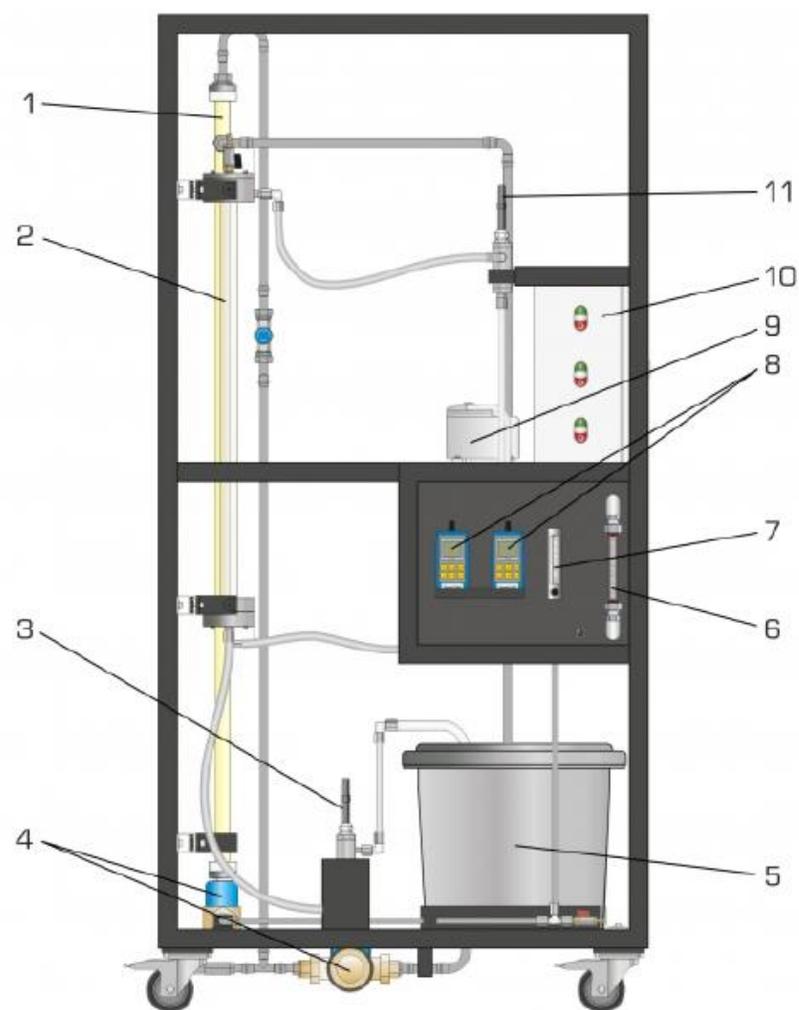


Figura 7. Esquema del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Gunt (Gunt, 2018).

donde

- 1: Columna de desorción
- 2: Columna de absorción
- 3: Sensores de oxígeno y temperatura después de la absorción
- 4: Bombas
- 5: Depósito
- 6: Caudalímetro (agua)
- 7: Caudalímetro (aire)

8: Analizadores de gases portátiles (concentración de oxígeno)

9: Compresor

10: Armario de distribución

11: Sensores de oxígeno y temperatura antes de la absorción.

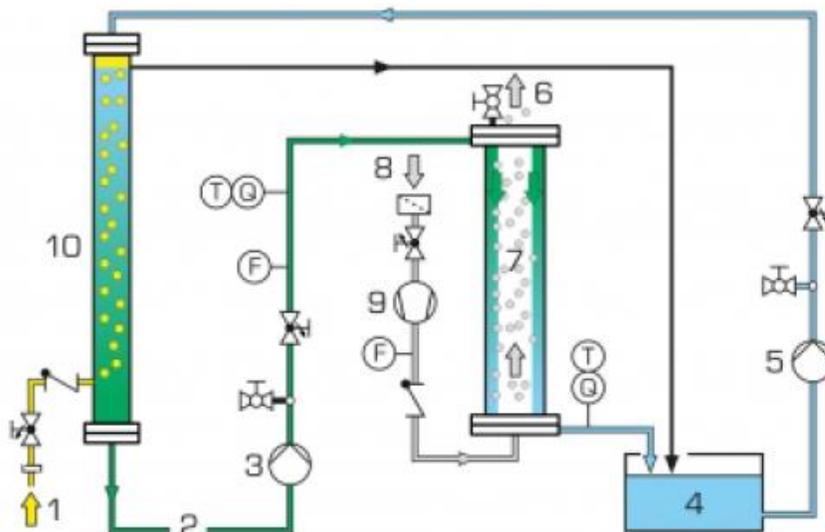


Figura 8. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Gunt (Gunt, 2018).

donde

1: Entrada de nitrógeno (externa)

2: Disolvente regenerado

3: Bomba

4: Depósito (disolvente con oxígeno disuelto)

5: Bomba

6: Salida de aire

7: Columna de absorción

8: Entrada de aire

9: Compresor

10: Columna de desorción

4.1.5.2. Edibon

Este posee un depósito de 40 L, dos bombas de 37 L/min y presión máxima de 2 bar, y el compresor tiene un caudal máximo de 6 m³/h. Tanto las bombas como el compresor se controlan desde computadora. Los sensores de caudal de aire y de nitrógeno tienen un rango de medición de 0 L/min -5 L/min, mientras que el del agua de 0.05 L/min - 1.6 L/min. Adicionalmente, los sensores de membrana de oxígeno tienen un rango de saturación de 0 % - 500 % con una resolución de 0.1 % y un error de medida menor a 0.2 %. El rango de concentración de 0 mg/L -50 mg/L con resolución de 0.01 mg/L y error de medida menor a 0.1 %. Por último, el rango de temperatura es de 0 °C – 50 °C con una resolución de 0.1 °C y error de medida menor a 0.5 °C.

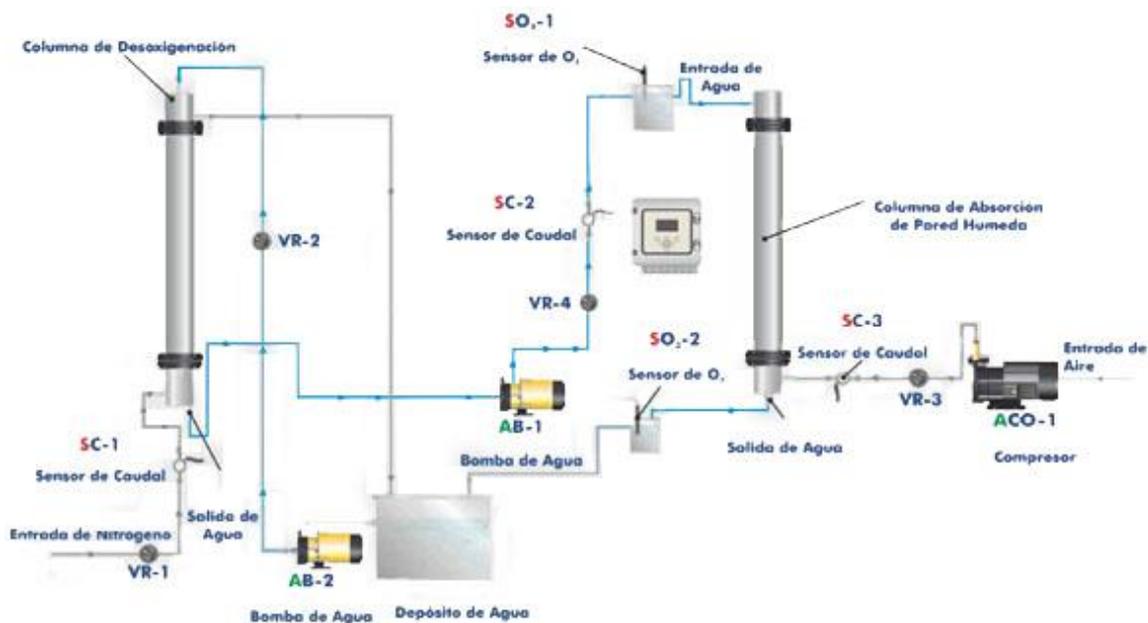


Figura 9. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Edibon (Edibon, 2018).

Por otra parte, este módulo también posee una caja de control, basada en LabView, con pantalla que presenta el diagrama del proceso en el panel frontal, donde se conectan todos los sensores. Visualiza simultáneamente en el computador todos los parámetros que

intervienen en el proceso, además, presenta también en tiempo real y de forma gráfica todas las respuestas del sistema. Además, almacena en un archivo todos los resultados y datos del proceso. Es posible cambiar en cualquier momento los valores de los actuadores desde el teclado. Posee además una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments con capacidad de 250 mil muestras por segundo.

4.1.5.3. Armfield

En el caso del módulo de Armfield, la bomba que alimenta la columna de absorción posee una capacidad de 10 L/min y una cabeza hidrostática de 1 m, mientras que la que alimenta la columna de desorción, tiene una capacidad de 20 L/min y una cabeza hidrostática de 2 m. El compresor tiene una capacidad de 24 L/min y el depósito de agua es de 40 L. El rotámetro que mide el flujo de aire, tiene un rango de 20 mL/min -280 mL/min.

Por otra parte, los medidores de oxígeno tienen un rango de 0 ppm - 19.9 mg/L, precisión de 0.2 mg/L y resolución de 0.1 mg/L. La temperatura tiene un rango de -100 °C - +200 °C, precisión de 0.3 °C y resolución de 0.1 °C.

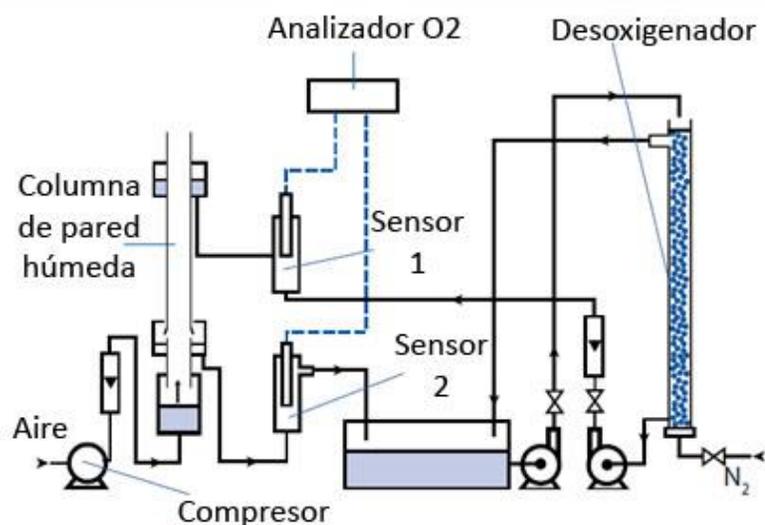


Figura 10. Esquema de flujos del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).



Figura 11. Esquema del módulo de torre de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).



Figura 12. Detalle del depósito inferior del módulo de pared húmeda del fabricante Armfield (Armfield, 2018).

4.2. Torre de enfriamiento

4.2.1. Descripción del equipo

Este equipo es utilizado para demostrar la operación y funcionamiento de una torre de enfriamiento, así como para estudiar el fenómeno de transferencia de masa en la humidificación del aire.

Está compuesto por:

Depósito de agua: Cajón de acero inoxidable de 0.7 m por 0.7 m de base y 0.3 m de altura, colocada sobre rodines para facilitar su movilidad en caso requerido. Tiene una capacidad aproximada de 100 L y su función es contener el agua en su proceso de calentamiento para que luego esta sea enviada a lo alto de la torre. Posee en su interior dos resistencias de 5 kW cada una para el calentamiento del agua. Este depósito tiene como entradas, además del agua que cae de la columna principal, la manguera utilizada para la calibración del rotámetro, tubería conectada a la línea de agua del laboratorio para llenar el depósito cuando este se encuentre vacío o requiera más agua, y la tubería que trae el agua de la salida de la torre de enfriamiento de flujo cruzado. Por otra parte, tiene como única salida la succión de la bomba.



Figura 13. Depósito de agua de la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Columna principal: En esta se da el contacto entre el agua descendente con la corriente de aire ascendente con el fin de humidificarlo y reducir la temperatura del agua. Consiste en un cajón con marco metálico y paredes de acrílico de 0.75 m por 0.75 m de base y 2.44 m de altura. Su extremo inferior se encuentra totalmente abierto mientras que, en su extremo superior, la única salida es el ducto de ventilación. En su parte frontal tiene dos puertas, una para la mitad superior y otra para la inferior, las cuales se pueden abrir para realizar cualquier acción necesaria dentro de la columna, ya sea mantenimiento, arreglos, entre otras.



Figura 14. Torre de enfriamiento de tiro inducido.

Rejillas: Estructuras con la función de romper los chorros y gotas del flujo de agua descendente por medio del choque, lo que permite que el agua baje en forma de gotas individuales y mejora su distribución. Son ocho en total y cada rejilla está compuesta por 32 tablillas de madera de 0.013 m por 0.006 m por 0.695 m. Las tablillas de las rejillas consecutivas están acomodadas de manera perpendicular respecto a la anterior.



Figura 15. Detalle de las rejillas de la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Ventilador: Ubicado en la parte superior y es el encargado de inducir una corriente de aire ascendente dentro de la torre. Se encuentra conectado a un controlador mediante el cual se puede regular la velocidad a la que este gira. Se desconoce la potencia o velocidad a la que este gira. Se encuentra altamente oxidado como se muestra en las imágenes.



Figura 16. Ventilador de la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Eliminador de arrastre: Sección dedicada a reducir la cantidad de gotas de agua que son arrastradas junto con el aire hacia el ducto de ventilación y fuera de la torre. Está construido utilizando piezas de hojalata dobladas en ángulos de 90°.



Figura 17. Eliminadores de arrastre.

Aspersores: Consiste en 4 duchas colocadas entre la rejilla superior y el eliminador de arrastre en un arreglo cuadrado de 0.20 m por 0.20 m. Su función es la de distribuir el agua caliente lo más uniforme posible sobre las rejillas.

Sistema de calentamiento: Consiste de dos resistencias eléctricas de 5 kW cada una, de 220 V, un sensor de temperatura dentro del tanque y una botonera desde donde se fija la temperatura deseada y se muestra la temperatura actual del agua medida por el sensor. Cabe señalar que este equipo anteriormente trabajaba con serpentín de vapor como método de calentamiento, sin embargo, fue necesaria la colocación de resistencias eléctricas al momento de ocupar el nuevo edificio de laboratorios, debido a que no se contaba con el servicio de vapor. Este serpentín se encuentra aún en el laboratorio y está fabricado utilizando tubo de cobre de 0.0159 m de diámetro externo (5/8 de pulgada de diámetro nominal). Posee 5 espiras de 0.32 m de diámetro aproximadamente; tiene una longitud total de 5.45 m. De las características antes señaladas, se obtiene un área de contacto de 0.272 m² aproximadamente.



Figura 18. Serpentín que utilizó la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Bomba: Tiene una capacidad máxima de 40 L/min medida experimentalmente, ya que no es posible leer la placa del fabricante debido a que se encuentra desgastada. Toma agua del depósito y la lleva hasta las duchas después de pasar por el rotámetro.



Figura 19. Bomba de la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Paletas anti derrame: Consiste en láminas de acero inoxidable, los cuales se colocan entre la parte inferior de la columna y el depósito de agua. Su función es la de desviar el agua de los bordes de la columna hacia el centro, con el fin de evitar que salga del equipo y caiga al

suelo. Se fijan al equipo mediante pequeñas aletas, las cuales se introducen en ranuras ubicadas en el marco de la columna.



Figura 20. Paleta anti derrame.



Figura 21. Detalle de la colocación de las paletas antiderrame.

Rotámetro: Colocado en el lateral del equipo, tiene una escala de porcentaje de flujo total de 0 % a 100 %, aunque debido a la capacidad de la bomba, se usa hasta un máximo de 40 % aproximadamente, es decir, el rotámetro se encuentra sobredimensionado.

Arreglo de tuberías: Construidas de tubería de hierro de 0.0422 m de diámetro externo (1 1/4 de pulgada de diámetro nominal) para la succión de la bomba y de 0.0267 m de diámetro externo (3/4 de pulgada de diámetro nominal) para la sección de descarga anterior al rotámetro y 0.0213 m (1/2 pulgada nominal) para la posterior a este. Se encuentran oxidadas.

4.2.2. Operación del equipo del equipo

Ciclo del agua

El punto de partida es la carga de la bomba. Esta tubería entra por la parte de arriba del depósito de agua desde donde la bomba succiona el agua. A la descarga de la bomba se encuentra una válvula de bola y un manómetro. Este tramo de tubería lleva hasta el rotámetro, donde se mide el flujo de agua. A la salida de este se encuentran tres válvulas de bola mediante las que se puede decidir si el flujo es enviado hacia la manguera utilizada para la calibración del rotámetro, hacia la torre de enfriamiento de flujo cruzado, o hacia lo alto de la torre de tiro inducido. En el caso en que el agua se envía hacia lo alto de la torre de tiro inducido, esta es llevada hasta las duchas por donde es rociada, para luego bajar por la columna principal y caer nuevamente al depósito de agua. Justo antes de las duchas hay otro manómetro, además de una válvula de bola que permite sacar muestras del agua de entrada de la torre con el fin de medir su temperatura, variable de interés de la práctica.

Recorrido del aire

En este caso, al poner en marcha el ventilador, se induce una corriente de aire ascendente dentro de la torre. Este flujo entra por la parte baja, que es totalmente abierta y es expulsada al ambiente por el ducto de ventilación en la parte superior del equipo.

4.2.3. Procedimiento de operación

- Como primer paso se debe calibrar el rotámetro. Para esto se utiliza la sección de manguera libre que sale de la tubería posterior a este. Se seleccionan varios puntos del rango utilizable del rotámetro (0 % – 40 %) y se calcula el flujo, para lo cual se utiliza una probeta y un cronómetro.
- Luego se debe calentar el agua hasta una temperatura aproximada de 55 °C, para esto el tanque se debe haber llenado con agua. No se recomienda temperaturas mayores para evitar problemas de cavitación de la bomba.

- El estudiante elige a qué nivel de velocidad del ventilador trabajará, así como los valores de flujo de agua con que operará la torre.
- La corrida inicia conectando la bomba y ajustando el rotámetro, luego se debe esperar a que el equipo llegue al estado estacionario.
- Alcanzado dicho punto se deben tomar medidas de la temperatura del agua de entrada a la torre (por medio de la llave de paso ubicada en la parte alta) y del agua de salida (sosteniendo un beaker bajo la torre hasta recolectar una muestra del agua). También se debe medir la humedad relativa del aire de entrada, colocando el termo anemómetro cerca de la base de la torre, y del aire de salida por medio de la introducción de dicho aparato por unos agujeros en la parte alta de la torre destinados para tal fin. Estas mediciones se anotan en libreta o computadora. El valor de flujo de aire se debe calcular a partir de la velocidad de este (medida con termo anemómetro) y el área de la torre. Como el equipo es un ducto cuadrado, los valores de velocidad se miden en varios puntos a lo largo de la diagonal de este cuadrado, para luego promediarlos.
- Una vez finalizada una corrida, se debe esperar a que el agua vuelva a calentarse y se debe variar el valor del flujo de agua para realizar otra corrida.

4.2.4. Módulos similares de fabricantes reconocidos

4.2.4.1. Armfield

Este fabricante presenta un módulo de torre de enfriamiento de flujo forzado, ya que el ventilador se encuentra en la parte de abajo. Esta torre tiene una altura de 0.70 m y la base es cuadrada de 0.15 m por 0.15 m. El panel frontal se puede retirar ya que con el módulo se incluyen cuatro bloques de relleno industrial de dos distintas densidades y tres diferentes alturas, aunque se especifica que la altura de relleno total es de 0.50 m. En su parte inferior posee un reservorio de agua capaz de conectarse a una tubería en caso de necesitar llenarse, además, este reservorio posee un calentador eléctrico de 1.75 kW de potencia

nominal. Es posible controlar la temperatura del agua del reservorio mediante un controlador PID.

Posee además una bomba de velocidad variable controlada por software y una capacidad de 0 L/min - 2.4 L/min, y un soplador también de velocidad variable controlado por software con capacidad de 0 L/min – 65 L/min. Posee instrumentación electrónica para medir el flujo de agua y aire, la temperatura del agua y aire y la humedad relativa del aire que entra y sale del relleno. Además, y de manera opcional, el módulo puede contener sensores que miden temperatura de agua y aire, así como humedad relativa, en tres distintos puntos del relleno. Tiene la posibilidad de conectarse mediante puerto USB a una computadora con Windows para controlar el equipo y realizar las mediciones.

Según el fabricante, este equipo se puede utilizar para prácticas de:

Tasa de flujo de aire en el rendimiento de una torre de enfriamiento, tasa de flujo de agua en el rendimiento de una torre de enfriamiento, temperatura del agua en el rendimiento de una torre de enfriamiento, carga de enfriamiento en el rendimiento de una torre de enfriamiento, densidad de empaque en el rendimiento de una torre de enfriamiento, altura de empaque en el rendimiento de una torre de enfriamiento, operación a potencia constante (carga de enfriamiento constante), operación a temperatura constante del agua, balance de masa y energía en las corrientes de aire y agua.



Figura 22. Módulo de torre de enfriamiento del fabricante Armfield (Armfield, 2018).



Figura 23. Detalle del relleno de la torre de enfriamiento del fabricante Armfield (Armfield, 2018).

4.2.4.2. Edibon

El módulo de Edibon es muy similar al de Armfield, con la diferencia de que en el de Armfield es posible cambiar el relleno de la torre, mientras que en el de Edibon se cambia la torre completa con el relleno dentro. Otra diferencia es que, en este caso, la altura de relleno para todas las torres es de 0.65 m. La bomba de agua tiene una capacidad de 2 L/min, mientras que el soplador una de 145 m³/h. El depósito de agua tiene 14 L de capacidad, y el calentador una temperatura máxima de calentamiento de 60 °C. Este módulo posee una consola electrónica donde se conectan todos los sensores y tiene un seleccionador para elegir cuál medición mostrar, sin embargo, también existe la opción de este módulo controlado por computadora.



Figura 24. Detalle de la columna (Edibon, 2018).

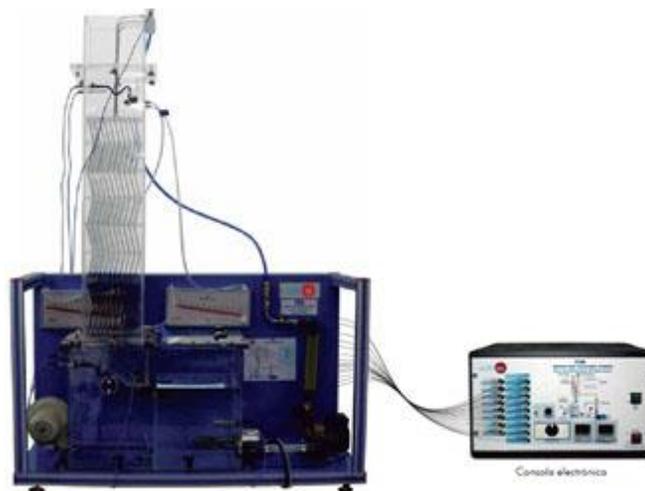


Figura 25. Módulo de torre de enfriamiento del fabricante Edibon (Edibon, 2018).

4.3. Tanque agitado con aireación

4.3.1. Descripción del equipo

Este equipo es utilizado para determinar el coeficiente volumétrico de transferencia de masa del oxígeno del aire hacia el agua.



Figura 26. Módulo de tanque agitado con aireación en su estado inicial del Laboratorio de Ingeniería Química.

De acuerdo a la Figura 26 se muestran las partes del módulo, en donde 1 representa el motor, 2 el arreglo de tuberías, 3 rotámetro, 4 controlador del motor, 5 agitador, 6 tanque y 7 burbujeador.

El equipo está compuesto por:

Motor de agitación: Consiste de un motor sujetado al marco del equipo. Se encuentra conectado a un controlador de revoluciones desde donde éstas se regulan. En el extremo de su eje tiene colocado un agitador de palas inclinadas (6 en total) de 0.10 m de diámetro.



Figura 27. Detalle del motor.

Tuberías: Consiste en un arreglo de tubería de hierro, accesorios de latón y válvulas de bola, que permite llevar el gas deseado hasta el burbujeador, ya sea aire o nitrógeno, pasando por el rotámetro en el caso del aire. Tiene una entrada para nitrógeno y otra para aire, así como una salida del gas requerido hacia el burbujeador. Además, también posee una salida hacia una manguera libre, con el fin de llevar nitrógeno hasta un beaker con agua, para ser usada en la determinación de la constante de rezago del sensor de oxígeno disuelto. El gas circula, y el destino de este se regula mediante las válvulas, las cuales son tres; la primera en la entrada de aire, colocada seguido del rotámetro y antes del burbujeador, la segunda

entre la entrada de nitrógeno y el burbujeador, y la tercera hacia la salida de la manguera libre.

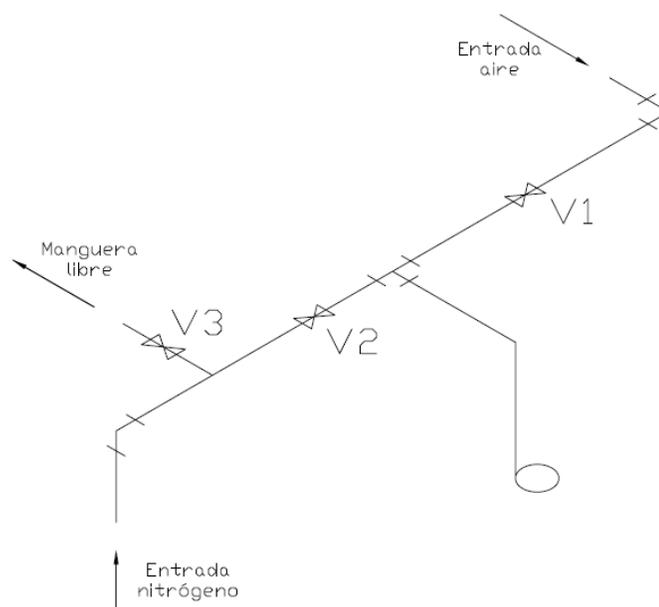


Figura 28. Diagrama del arreglo de tuberías del tanque agitado con aireación (Elaboración propia).

Rotámetro: Este se encarga de medir el flujo de aire. Tiene un rango de medición de 3 L/min a 30 L/min y una resolución de 1 L/min.

Controlador del motor: Equipo mediante el cual se controla la velocidad a la que gira el motor. Tiene una capacidad máxima de 2 300 rpm y se encuentra ubicado sobre la superficie del módulo.

Sensor de oxígeno disuelto: Este equipo consiste en una probeta de oxígeno disuelto, la cual se fija en la tapa del tanque de manera que su extremo inferior quede sumergido en el líquido. Además, esta probeta se conecta a un medidor portátil, el cual recibe las señales y muestra en pantalla la medición de oxígeno disuelto como un valor de partes por millón.



Figura 29. Detalle de la superficie de trabajo.

Tanque: Consiste en un tanque de acrílico transparente de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, provisto de tapa plana, la cual se atornilla y fija al tanque. Esta tiene una adaptación para introducir una probeta de oxígeno disuelto, además de agujeros por donde se introducen el eje del agitador y la tubería que provee de gas, ya sea aire o nitrógeno. Este no posee medidas estándar ya que en un tanque de estas proporciones se han observado salpicaduras y desbordamientos de agua. Además, el tanque se llena hasta una altura mayor que el valor de su diámetro con el objetivo de que el nivel de agua alcance la probeta.

Marco del equipo: Estructura metálica fabricada de tubo cuadrado. Tiene una altura a la base de la mesa de 0.120 m y por debajo de esta tiene la totalidad del espacio vacío sin aprovechar. Además de la mesa, tiene un brazo donde se sujeta el motor de manera fija. Adicionalmente, también posee una estructura donde se fijan las tuberías, el rotámetro y un monitor de computadora, el cual se encuentra en desuso. Ya que el módulo contó con sistema de control automático, el cual dejó de utilizarse. La superficie de la mesa está compuesta primeramente por una lámina metálica, sobre la cual se coloca una lámina de acrílico. Entre estas dos láminas se acumula humedad, por lo que la lámina metálica se

encuentra altamente oxidada, problema que también posee la superficie de la sección inferior.

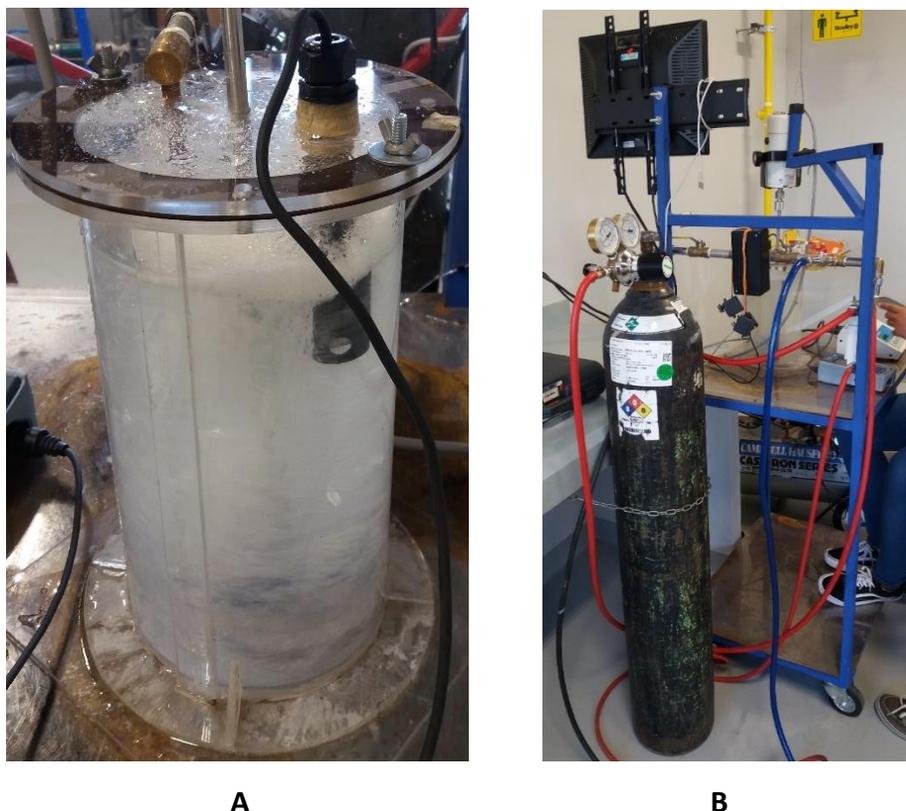


Figura 30. Detalle del tanque (A) y de la parte trasera del módulo (B).

Burbujeador: Consiste en un tubo de cobre de 0.0095 m de diámetro de tubería (3/8 de pulgada de diámetro nominal) con forma de anillo de 0.06 m de diámetro y 16 agujeros de 0.001 m de diámetro por donde burbujea el gas deseado.

4.3.2. Procedimiento de operación

- Para la operación primeramente se debe determinar el rezago del sensor, para lo cual se utilizan dos beakers con tapa de poliestireno expandido, las cuales cuentan con un agujero para introducir la probeta de oxígeno disuelto. Se burbujea simultáneamente en ambos beakers, uno con aire y el otro con nitrógeno hasta alcanzar el equilibrio en ambos, es decir, la medición en el beaker donde se burbujeó

nitrógeno debe ser de 0 % oxígeno disuelto, mientras la de aire debe permanecer en un valor constante, el cual corresponde a la concentración de oxígeno en el equilibrio. El aire proviene de una manguera conectada directamente a la línea de aire comprimido del laboratorio, mientras que el nitrógeno proviene de la manguera libre del módulo, para lo cual se debe abrir la válvula 3 y cerrar las 2 y 1, de acuerdo a la Figura 28.

- Con el sensor sumergido en el beaker con nitrógeno, y una vez que se alcanzó el equilibrio, se pasa manualmente y lo más rápido posible al otro beaker momento donde se empiezan a tomar las mediciones respecto al tiempo; con estos datos se realiza la determinación de la constante de rezago del sensor, que se usará para corregir los datos tomados en las corridas del experimento.
- Para iniciar las corridas, el tanque se debe haber llenado ya con agua hasta dos tercios de su capacidad. Seguidamente, se inicia la agitación a una velocidad elegida por los estudiantes, donde no haya coalescencia de burbujas ni derrames de agua por salpicadura.
- Se debe eliminar todo el oxígeno disuelto en el agua, para esto se cierran las válvulas 3 y 1 y se abre la 2, mostradas en la Figura 28, con el fin de permitir el paso del nitrógeno desde el tanque hacia el burbujeador.
- Una vez eliminado el oxígeno, rápidamente se cierra la válvula 2 y se abre la 1, lo que permite la entrada de aire al burbujeador y marca el tiempo cero de la corrida. El rotámetro se debe haber ajustado al valor deseado.
- Se miden los valores de concentración de oxígeno respecto al tiempo hasta alcanzar el equilibrio, para lo cual, se graba en video la pantalla del medidor portátil utilizando el teléfono de un estudiante, para que posteriormente y como parte de los cálculos, este extraiga los datos de dicho video de una manera manual.
- Por último, se varían las condiciones de agitación y flujo de aire para realizar nuevas corridas.

4.3.3. Módulos similares de fabricantes reconocidos

4.3.3.1. Edibon

Este equipo permite las operaciones de mezclado e intercambio de gas y también transferencia de calor en el caso en que se le acople un elemento extra. Está compuesto por un depósito de 20 L de capacidad, agitador con control de velocidad variable, tubo de inyección de aire, medidor de caudal de aire con un rango de 0.4 L/min -5 L/min, una bomba de aire ubicada en la parte inferior del módulo. Posee 6 agitadores distintos, 2 de palas, 2 de hélice y 2 de turbina, cada uno de 0.01 m y 0.05 m de diámetro. Además, incluye también 3 tipos de difusor de aire, tubo esparcidor, difusor de disco y difusor único. La probeta de oxígeno disuelto tiene un rango de medición de 0 mg/L – 60 mg/L. El sensor de temperatura tiene un rango de -19.9 °C a +149.9 °C (0.1 °C).



Figura 31. Esquema del módulo de tanque agitado con aireación del fabricante Edibon (Edibon, 2018).

El fabricante expresa que, como posibilidades prácticas, se tienen la determinación de las necesidades de aireación, influencia del volumen de oxígeno inyectado, de la velocidad de giro del agitador, de la temperatura en el proceso, del nivel de líquido en el depósito y de la composición de agua. Mientras que como posibilidades adicionales están la medición del coeficiente de absorción y la capacidad de oxigenación y efectos de la transferencia de oxígeno bajo condiciones de estado no estacionario.



Figura 32. Diagrama del módulo de tanque agitado con aireación del fabricante Edibon (Edibon, 2018).

Capítulo 5

Herramienta para la selección de las mejoras a realizar

Se procedió a la creación de una herramienta que tuviera como finalidad la selección de las mejoras a realizar de una manera técnica. Esta herramienta consistió en elaborar una lista en la que se enumeraron todas las posibles oportunidades de mejora, acompañadas de un fundamento técnico que justificara su implementación. Para la construcción de la herramienta se utilizó la descripción del estado inicial de los equipos, el análisis de los manuales de equipos similares de fabricantes reconocidos, así como reuniones con profesores y estudiantes.

La forma de validar esta herramienta consistió en su análisis y discusión en una reunión con el Profesor Director y los Profesores Lectores, donde se eligió qué mejoras se llevarían a cabo. Esta herramienta se presenta a continuación, así como la decisión acordada para cada oportunidad de mejora. Es importante señalar que esta herramienta se muestra con las decisiones acordadas en dicho momento, sin embargo, en ciertos casos y por razones justificadas técnicamente, no fue posible la realización de dicha mejora, o fue necesaria la modificación de esta, lo cual se explica más adelante.

5.1. Torre de pared húmeda

5.1.1. Cambiar la columna principal

Problema: La columna posee imperfecciones permanentes en su interior. Se han observado incrustaciones importantes en el vidrio, las cuales desvían completamente el flujo de dicho punto, creando ondulaciones y corrientes no deseadas en la película de agua, impidiendo la obtención de una película estable y laminar, el cual es el objetivo de la práctica.

Propuesta y fundamento: Se propone el cambio de esta columna por una nueva, la cual tenga su pared interior limpia y sin alguna imperfección que dificulte la obtención de la película laminar.

Mejoras:

- Obtención de una película estable y con esto la operación del equipo dentro del modelo de película en régimen laminar.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.2. Disminuir la longitud de la torre secundaria inferior

Problema: El equipo inicial posee una gran altura, de más de 3 metros. Esto conlleva a tres principales problemas:

- Dificultad para obtener una película estable: Debido a su gran tamaño, este equipo oscila con facilidad ante cualquier manipulación, se ha observado que inclusive la manipulación propia de toma de datos. Debido a esto, la película se perturba constantemente, lo que aleja al equipo de su modelo de funcionamiento, en el cual la película de agua debe ser totalmente estable y en régimen laminar.
- Riesgos por caída al subir a gran altura: Se deben tomar mediciones a la salida de la columna principal, la cual se encuentra en la parte alta del equipo, por lo que se hace necesario el uso del andamio con el riesgo de caídas desde este.
- Mala observación por parte del estudiante: La columna principal, sección del equipo donde ocurre el fenómeno de interés de la práctica, se encuentra a gran altura y resulta difícil de observar, especialmente por los estudiantes de menor altura.

Propuesta y fundamento: La columna secundaria inferior, es decir, la utilizada para la estabilización del aire de entrada, posee una longitud de 1.10 m, siendo el componente de mayor tamaño, el cual se podría reducir. Cengel y Cimbala (2006) afirman que los efectos de entrada se vuelven insignificantes a una longitud de 10 diámetros de tubería para la mayoría de casos de interés en ingeniería. El diámetro de la columna es de 0.026 m y bajo este criterio, una longitud de 0.26 m, es decir, solo el 24 % de su longitud es suficiente para la función requerida. Módulos comerciales como el de Armfield tienen para este propósito

columnas de tan solo 0.35 m aproximadamente, mientras que los de Gunt y Edibon no cuentan con una sección para tal fin. Si bien es cierto, eliminar los efectos de entrada del aire es de gran importancia para el estudio de este fenómeno, la columna usada es de gran tamaño y difiere en gran medida de los módulos comerciales.

Mejoras:

- Reducción de las vibraciones del equipo y con esto la obtención de una película más estable.
- Reducción del riesgo de operación al disminuir la altura a la que es necesario subir.
- Facilidad de operación al ser un equipo de menor tamaño.
- Mejor observación del fenómeno por parte del estudiante, ya que la columna principal se encuentra a gran altura.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.3. Ampliar el extremo inferior de la nueva columna principal

Problema: El extremo inferior de la columna (campana) encargado de desviar el flujo de agua hacia el depósito para evitar que caiga dentro de la columna inferior resulta insuficiente para cumplir este objetivo, y parte del flujo de agua, en efecto, cae dentro de esta columna, donde se acumula. Esto causa un problema muy importante, ya que en dicho punto la humedad del aire de entrada ya se encuentra medida con anterioridad. Se han observado prácticas de laboratorio en que hay acumulados más de 0.15 m de agua en esta columna, y con la entrada de aire se produce un burbujeo vigoroso. Esto inevitablemente humedece el aire, por lo que el valor real de humedad del aire de entrada y el valor medido difieren, lo que conlleva a un error importante en los cálculos y la obtención de resultados erróneos.

Propuesta y fundamento: Los cálculos se están realizando con valores de humedad que no corresponden a los introducidos realmente a la columna, por lo que, para obtener resultados reales, se propone ampliar dicha campana con soplete, para desviar mejor el flujo de agua de salida y evitar que este caiga en la columna inferior.

Mejora:

- Corrección de error en el funcionamiento del equipo.
- Operación del equipo bajo las condiciones medidas y obtención de resultados más exactos.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.4. Nueva automatización de la toma de datos

Problema: Todos los sensores del módulo se encuentran en mal estado, lo que lleva a varios problemas:

- Necesidad de utilización de termómetros comunes para medir temperatura y termo anemómetro portátil para medir humedad relativa, lo que conduce a vibraciones del equipo por la manipulación en la toma de datos y con esto la perturbación de la película.
- Necesidad de utilización del andamio, lo que supone un riesgo por caída.

Propuesta y fundamento: Aunque se cuenta con un tablero Arduino, todos los sensores se encuentran en mal estado. Tanto los sensores de humedad como los de temperatura no funcionan correctamente, ya que los de humedad miden permanentemente un valor de 99 % de humedad relativa, mientras que los de temperatura indican en ocasiones valores menores a -20 °C, o mayores a 90 °C, en una práctica donde se trabaja a temperatura ambiente. Esto conlleva a la imposibilidad de uso de estos sensores, haciendo necesaria la utilización de termómetros corrientes y termo anemómetro portátil, y con esto el uso del

andamio y la no utilización del tablero Arduino ya presente. Por esta razón, aunque el Arduino se encuentra en buen estado, no se está utilizando en absoluto.

Por esto se propone volver a automatizar la toma de datos en este módulo, mediante la compra de sensores más robustos, ya que los utilizados inicialmente al ser de bajo costo, tienen una vida útil muy corta y se dañan con facilidad. También, estos tienen una incertidumbre de ± 5 % de humedad relativa, valor que resulta de gran magnitud para las necesidades de la práctica.

Mejoras:

- Facilidad en la toma de datos, lo que permite al estudiante una mejor observación de la práctica.
- Obtención de datos más robustos y con esto también un resultado final más exacto.
- Elimina la necesidad de compra continua de nuevos sensores, y la utilización temporal de termómetros mientras se consiguen y cambian dichos sensores.
- Reducción del riesgo por caída al eliminar la necesidad de subir a lugares elevados.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.5. Cambiar la bomba

Propuesta y fundamento: La bomba utilizada inicialmente es una bomba sumergible, de las dos que actualmente existen en el laboratorio. Se han observado casos en que estudiantes requieren su uso, pero al ser escasas, estas se encuentran ocupadas en otras tareas incluida la práctica de torre de pared húmeda. Ya que esta práctica no requiere que la bomba sea estrictamente de tipo sumergible, se propone cambiarla por una bomba centrífuga común de similar capacidad; la actual trasiega un máximo de 7 L/min.

Mejora:

- Liberación de una bomba de tipo escaso en el laboratorio, de una tarea que no exigía estrictamente una de este tipo.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.6. Cambiar el reservorio de agua

Propuesta y fundamento: El reservorio de agua es un cajón plástico de uso cotidiano, el cual se encuentra totalmente independiente al resto del equipo. Si se cambia la bomba por una centrífuga, un cajón plástico dificultaría la conexión con la bomba, por lo que se propone la fabricación de un nuevo reservorio metálico, en el cual se pueda colocar una bomba centrífuga. Se recomienda construir un marco para soportar el reservorio y la bomba, que sea independiente del equipo, ya que una bomba centrífuga produce vibraciones que podrían perturbar la película laminar.

Mejora:

- Posibilidad de colocación de una bomba centrífuga.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.7. Tratamiento del agua y limpieza de la columna al terminar el bloque de prácticas

Propuesta y fundamento: La película de agua en este equipo debe ser laminar y lo más estable posible. Ha ocurrido que al dejar húmeda la columna al terminar las prácticas del semestre, a largo plazo la dureza del agua se incrusta en las paredes internas de la columna, lo que perturba la película. Limpiezas de este tipo de incrustaciones pueden dañar la superficie de la columna, dejando como resultado imperfecciones permanentes que perturbarán la película. Por esta razón, se recomienda la operación del equipo utilizando agua destilada, o el enjuague del equipo con esta sustancia al finalizar cada práctica.

Mejoras:

- Se evita la formación de incrustaciones en la columna que perturben la película laminar.
- Se evita la necesidad de desmontar la columna para su limpieza en caso de aparición de incrustaciones.
- Se evita dañar la superficie interna en limpiezas de incrustaciones.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.1.8. Soportar el equipo para reducir vibraciones

Propuesta y fundamento: Actualmente cualquier tipo de movimiento del equipo, incluida la manipulación propia de la realización del experimento, perturban la película laminar, lo que aparta el modo de funcionamiento del modelo deseado y con esto, la introducción de errores. Por esta razón, se propone colocar soportes al equipo para evitar estas oscilaciones.

Mejora:

- Obtención de película de agua laminar estable.

Decisión acordada:

- Ya que el equipo necesitaba alineación y colocación de soportes, y además se le realizarían modificaciones mayores tales como reducción de tamaño y colocación y fijado de un nuevo tanque, se decidió construir nuevo el marco del equipo.

5.1.9. Tareas de mantenimiento

- Alinear el equipo: Este no se encuentra totalmente vertical, lo que induce a errores ya que interfiere con la formación de la película. Se debe ajustar este con nivel para

colocarlo totalmente vertical y luego fijar el equipo. (Esta tarea quedó obsoleta al decidir la construcción de un nuevo marco)

5.2. Torre de enfriamiento

5.2.1. Aumentar la potencia de calentamiento inicial

Problema: La potencia de calentamiento es insuficiente para llevar a cabo la práctica usando los flujos normales de operación.

Propuesta y fundamento: La torre posee dos resistencias de 5 kW cada una, para un total de 10 kW. En el Cuadro 1 se puede observar la potencia disipada por ambas torres de enfriamiento variando el valor de flujo de agua de entrada, dichos datos se tomaron en una práctica de laboratorio, bajo condiciones normales de operación cuando este equipo aun utilizaba serpentín de vapor para su calentamiento, en un día lluvioso en que la temperatura ambiente fue de 22.5 °C.

Cuadro 1. Potencia disipada por ambas torres de enfriamiento del laboratorio para distintos flujos de agua.

Torre	Rotámetro (%)	Flujo agua (L/s)	Flujo agua (L/min)	T agua entrada (°C)	T agua salida (°C)	Potencia disipada (kW)
Tiro inducido	10	0.126	7.6	50.75	31.8	9.96
	15	0.214	12.8	47.65	33.45	12.71
	20	0.303	18.2	44.05	35	11.45
Flujo cruzado	10	0.126	7.6	45.55	26.15	10.19
	20	0.303	18.2	43.85	26.7	21.70
	30	0.480	28.9	44.7	27.6	34.29

Del Cuadro 1, se puede notar que la potencia de calentamiento instalada resulta insuficiente para operar las torres de enfriamiento bajo condiciones normales. Este hecho, ocasionaría que el estado estacionario se alcance a temperaturas más bajas que las utilizadas

normalmente. El Cuadro 2 muestra la temperatura del agua de entrada y salida que se obtienen en ambas torres de enfriamiento en el estado estacionario, utilizando 10 kW de potencia de calentamiento.

Cuadro 2. Condiciones alcanzadas en el estado estacionario en ambas torres de enfriamiento utilizando la potencia instalada.

Torre	Rotámetro (%)	Flujo de agua (L/min)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura salida (°C)	Cambio temperatura (°C)
Tiro inducido	10	7.6	42	29.5	12.5
	20	18.2	36	31.5	4.5
Flujo cruzado	10	7.6	44.5	25	19.5
	15	12.8	34.5	25	9.5
	20	18.2	31	25	6
	25	23.47	29	24	5
	30	28.78	27	23.5	3.5

En el Cuadro 2 se denota que no es posible mantener una temperatura constante de entrada para todos los flujos de trabajo, y el mínimo común es un aumento de tan solo 3.5 °C para un valor del rotámetro del 30 % (recordar que la bomba puede alcanzar hasta el 40 % del rotámetro instalado). Si se desea operar el equipo a una temperatura constante de entrada para todas las corridas, se debe calentar el reservorio de agua antes de cada una, lo que ocasiona tiempos muertos de espera entre cada corrida y aumento del tiempo total de la práctica.

Se propone la colocación de al menos 30 kW de potencia de calentamiento para poder utilizar todo el rango de flujo que la bomba es capaz de proveer y eliminar tiempos muertos. Para realizar el calentamiento se consideró la opción de utilizar calentadores de agua eléctricos domésticos para esta tarea, sin embargo, estos tienen potencias de no más de 15 kW con precios que rondan los 200 000 colones cada uno, es decir, no otorgan la potencia requerida y son de alto costo. Por otra parte, calentadores domésticos con tanque reservorio tampoco resultan adecuados ya que estos trabajan a potencias muy bajas,

alrededor de 3 kW, y almacenan esta agua caliente para su posterior uso; el volumen del reservorio no cubre la necesidad de la práctica del laboratorio. Calentadores de gas también presentan el inconveniente de que no entregan potencia suficiente (alrededor de 24 kW), con precios alrededor de 400 000 colones. Se consideró como opción viable el uso de una resistencia única de 30 kW de potencia, ya que esta se puede construir mediante fabricantes nacionales según las especificaciones deseadas, esto por precios de alrededor de 155 000 colones.

Mejora:

- Operación a temperatura constante del agua de entrada, eliminando tiempos de espera entre cada corrida.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.2.2. Cambiar el rotámetro

Problema: El rotámetro se encuentra sobre dimensionado.

Propuesta y fundamento: El rotámetro utilizado se encuentra sobredimensionado, ya que la bomba apenas tiene la capacidad de alcanzar poco más del 40 % de la totalidad del rango de este (aproximadamente 40 L/min). Mediante el uso de un rotámetro con un rango que coincida con el de la bomba, es posible trabajar con mayor cantidad de flujos, ya que con el utilizado se deben elegir puntos entre un rango pequeño, pero que estén lo suficientemente alejados entre sí para notar una diferencia. Para la bomba instalada, se recomienda un rotámetro que tenga un rango de 0 a 40 L/min.

Mejoras:

- Dimensionamiento correcto de los equipos.
- Mayor posibilidad de elección de flujos de trabajo.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.2.3. Cambiar el reservorio de agua por uno de mayor área transversal

Problema: Ya que las dimensiones de la base de la torre coinciden con las del reservorio, se produce gran cantidad de derrames y problemas como los siguientes:

- Los derrames son un problema en sí mismos, ya que un equipo como este no debería presentar fugas, y estas son de gran magnitud.
- Los derrames también representan un riesgo por caída, ya que el piso se torna resbaloso.
- Un estudiante debe ocuparse constantemente de limpiar los derrames, por lo que pierde atención en la práctica y no obtiene el mayor provecho de esta.
- Las fugas de agua representan también un riesgo de accidente eléctrico, ya que esta puede llegar a las conexiones de las resistencias eléctricas, ubicadas en la parte trasera del reservorio.
- Se debe reponer el agua perdida cada cierto tiempo, para esto se utiliza agua fría, por lo que se pierde el estado estacionario y se incluyen tiempos de espera adicionales para la estabilización de las condiciones.

Propuesta y fundamento: La sección interna de la torre es de 0.70 m por 0.70 m, medidas que coinciden exactamente con las del depósito de agua. Por esta razón, inevitablemente parte del flujo de agua que cae de la torre al depósito se escapa por los bordes, lo que ocasiona grandes derrames de agua, aún con la presencia de las pantallas deflectoras utilizadas para minimizar este problema. Por esta razón, se propone el uso de un depósito de agua de mayores dimensiones que las de la torre de enfriamiento, con el fin de atrapar toda el agua que caiga de la torre.

Mejoras:

- Eliminación de fugas
- Reducción de riesgo de accidente por caída.
- Reducción de riesgo de accidente eléctrico.
- Mayor aprovechamiento de la práctica por parte de los estudiantes.
- Eliminación de la necesidad de reponer agua constantemente.

Decisión acordada:

- Se acordó que la construcción de un nuevo tanque (y en consecuencia la de una nueva base para la torre) es una solución de alto costo económico para únicamente eliminar fugas, ya que estas pueden corregirse por métodos más sencillos y de menor costo, como la construcción de deflectores del flujo de agua descendente.

5.2.4. Cambiar la base de la torre

Problema: La base utilizada no permite el uso de un depósito más grande.

Propuesta y fundamento: Si se cambia el depósito de agua, se debe cambiar la estructura metálica sobre la cual se monta la torre de enfriamiento con el fin de hacerla poder contener en su parte inferior un nuevo depósito de agua más grande para evitar los derrames, ya que en la base está construida específicamente para el depósito utilizado y no permite el uso de uno más grande.

Mejora:

- Permite el uso de un depósito de mayor tamaño, con las ventajas propuestas anteriormente.

Decisión acordada:

- Debido a que esta acción va ligada a la de construir un nuevo tanque, la decisión acordada fue la misma, por el mismo argumento.

5.2.5. Automatización de la toma de datos

Propuesta y fundamento: Mediante la colocación de sensores que midan automáticamente las variables de interés, se logra facilitar la toma de datos y operación del equipo, además, mediante la presentación en pantalla y graficación en tiempo real de estos valores, se cuenta con una herramienta más para el provecho que el estudiante pueda sacar de la práctica y su aprendizaje. Para esto sería necesario colocar sensores de humedad en la parte alta y baja de la torre, de modo que los datos sean presentados en una pantalla de computadora y guardados dentro de un archivo. Adicionalmente sería necesario colocar sensores de temperatura del agua de entrada y salida. La de entrada por medio de un sensor introducido dentro de la tubería, mientras que la del agua de salida por medio de un sensor colocado en un pequeño depósito adherido a la pared interna de la torre. Este depósito se llenaría con el agua que cae y se vaciaría por rebalse o por un pequeño agujero en su parte inferior, lo suficientemente pequeño para mantener un nivel de agua en su interior. Al ser un depósito pequeño, tendría una variación de temperatura rápida, con el fin de que la medición sea de valores de temperatura en ese instante.

Mejoras:

- Facilidad de operación del módulo y de toma de datos.
- Mayor visualización y aprendizaje del estudiante.

Decisión acordada:

- Esta mejora se consideró de muy baja prioridad, ya que automatizar la toma de datos en este equipo no era de primera necesidad, debido a que no hay ningún inconveniente con la toma actual de datos.

5.2.6. Colocación de sensores de temperatura a lo largo de la torre:

Propuesta y fundamento: El objetivo de un equipo como este es la reducción de la temperatura de una corriente de agua, es decir, la variable de mayor interés es la

temperatura de dicha corriente. Como parte de la automatización de la toma de datos, se propone colocar sensores de temperatura después de cada rejilla con el fin de observar el perfil dentro de la torre y no solamente a la entrada y salida de esta, de manera que el estudiante visualice el fenómeno estudiado en el curso teórico.

Mejora:

- Mayor visualización del fenómeno estudiado.

Decisión acordada:

- Debido a que esta acción va ligada a la de automatizar la toma de datos, la decisión acordada fue la misma, por el mismo argumento.

5.2.7. Cambiar el sistema de aspersión de agua

Problema: Las duchas se encuentran en mal estado y no son un sistema de aspersión adecuado.

Propuesta y fundamento: El objetivo de un sistema de aspersión en una torre de enfriamiento, es distribuir uniformemente en toda el área de la torre el flujo de agua, para que esta caiga de manera regular haciendo contacto con la corriente de aire. Bajo este supuesto, el mejor sistema de aspersión será el que cumpla con dicho objetivo. Las duchas expulsan el flujo en cuatro puntos localizados directo hacia abajo, es decir, no distribuyen el agua uniformemente en toda el área de la torre, por lo que no se considera un sistema de aspersión adecuado. Aspersores como los utilizados contra incendios tienen la particularidad que extienden el cono de aspersión en una gran área, por lo que el agua chocaría contra las paredes internas de la torre y bajaría por estas, por lo que tampoco se consideran adecuados. Aspersores tipo niebla tampoco resultan adecuados ya que facilitarían el fenómeno de arrastre de gotas de agua con el flujo de aire.

Se propone la colocación de una estructura en forma de parrilla de tubos perforados, la cual se caracterizaría por cubrir uniformemente el área transversal de la torre, sin tirar el agua

hacia las paredes de esta, mediante esto, se cumpliría con el objetivo de un sistema de aspersión. Una parrilla del tamaño del área de la torre tendría un gran tamaño y si se fabricara de hierro tendría un gran peso, lo que dificultaría su soporte dentro del equipo, por esta razón, se propone fabricarla de policloruro de vinilo clorado o CPVC (PVC para agua caliente), el cual es fácil de trabajar, instalar y sostener, debido a su bajo peso.

Mejora:

- Distribución uniforme del agua por toda el área de la torre.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.2.8. Colocar el ducto de ventilación de la torre de tiro inducido fuera del laboratorio

Propuesta y justificación: La humedad y temperatura del aire de entrada a la torre son variables de interés en el experimento. El aire de salida de la torre se expulsa muy húmedo y a mayor temperatura que el aire del ambiente. A nivel industrial esto no es un problema porque las torres de enfriamiento son equipos que normalmente trabajan en el exterior. Sin embargo, si esta corriente se libera dentro del laboratorio, las condiciones del ambiente dentro de este irán cambiando paulatinamente, es decir, subirá la humedad y temperatura ambiente. Esto provoca que la torre no trabaje en estado estacionario, por lo que se incurre en errores en los resultados, más aún cuando las condiciones ambientales se miden una sola vez al inicio de la práctica y se suponen constantes por el resto de esta. Ya que las torres no se pueden operar en el exterior, debido a que no hay un espacio destinado a este fin, se propone sacar la chimenea de la torre de tiro inducido fuera del laboratorio.

Mejora:

- Disminución del error en la operación del equipo, al evitar fenómenos no contemplados en los cálculos, como es el caso de la recirculación de aire caliente.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.2.9. Tareas de mantenimiento

- Mantenimiento de las rejillas: De las visitas al laboratorio se comprueba que la totalidad de las rejillas de la torre se encuentran en buen estado, por lo que se propone continuar utilizándolas, sin embargo, la parte de estas que sí muestran un ligero deterioro es el barniz de la superficie, por lo que, para darle mantenimiento y aumentar su vida útil, se propone lijar estas rejillas y volver a barnizarlas. Así también, lijar y barnizar los soportes de rejilla y demás partes de madera. Esto con el fin de evitar que agua penetre en la madera y la dañe.
- Mantenimiento a las tuberías: El sistema de tuberías se encuentra armado con piezas de todo tipo, lo que no lo hace ver como una unidad y le resta estética. Se propone el lijado y pintura de este, tanto para mejorar la apariencia como para proteger las tuberías, ya que algunas no se encuentran pintadas y ligeramente oxidadas.

5.3. Tanque agitado con aireación

5.3.1. Cambiar el difusor de gas

Propuesta y fundamento: Se tienen reportes de que el difusor se desprende con facilidad. Se propone colocar un nuevo difusor de gas para evitar el desprendimiento de este, además, se proponen dos cambios en el diseño del difusor. Que el nuevo posea mayor cantidad de agujeros que el actual (16 agujeros) y que estos sean de menor diámetro que los actuales (0.001 m). Según Treybal (1980), a menor diámetro de orificio, menor diámetro de burbuja, y a menor diámetro de esta, mayor es el área de contacto y la transferencia de masa. Mediante este cambio se pretende hacer más eficiente la desoxigenación con nitrógeno, logrando así un ahorro de este gas. También, al aumentar la transferencia de

masa, se reduce el tiempo de cada corrida. Por esta razón, se propone el uso de un burbujeador del tipo piedra difusora

Mejoras:

- Aumento de la transferencia de masa
- Ahorro de nitrógeno
- Reducción del tiempo de corrida.

Opciones:

En el mercado nacional, se ofrece un difusor de gas de acero inoxidable sinterizado con orificios de $2 \cdot 10^{-6}$ m (2 micrómetros) a un costo que ronda los 7 000 colones. Tiene la ventaja de poseer poros de un tamaño muy reducido, con la producción de burbujas muy pequeñas, pero con gran área de transferencia de masa total.



Figura 33. Difusor de gas de acero inoxidable (Ticobirra, 2019).

Resulta de fácil instalación ya que cuenta con espiga para conexión de manguera. Como desventaja se puede citar que su manipulación es delicada, ya que el fabricante recomienda no tocarlo con las manos descubiertas, debido a que la grasa de las manos puede ocluirlo; se recomienda utilizar guantes o un paño limpio para manipularlo. En la práctica de laboratorio, no se requiere la manipulación del difusor por parte de los estudiantes, por lo que esta desventaja no tiene impacto durante la práctica.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.2. Automatizar la toma de datos

Problema: La toma de datos se realiza mediante proceso incómodo e ineficiente, lo cual abre la posibilidad a errores.

Propuesta y fundamento: La toma de datos se realiza utilizando un teléfono celular para grabar un video de la pantalla del sensor de oxígeno, y posteriormente los estudiantes extraen esta información y la trasladan a mano, a una hoja de cálculo. Para realizar los cálculos y mostrar buenas gráficas, se deben usar gran cantidad de datos, por lo que extraer esta información resulta incómodo. Por otra parte, se corre el riesgo de confundir qué video corresponde a cada corrida, ya sea a la hora de identificar los videos o de compartirlos con los compañeros de grupo, incurriendo en errores en los cálculos y en la información reportada. Este problema se agrava al requerir grabar los videos en distintos teléfonos, ya que es común agotar el espacio en memoria debido al gran tamaño de estos archivos (hecho que ha sido observado).

Por esta razón, se propone que los datos se almacenen debidamente nombrados automáticamente en una computadora para ser extraídos, y también, que estos sean graficados en tiempo real en pantalla, con el fin de observar mejor el fenómeno estudiado. Además, de esta manera se observaría gráficamente la saturación del agua con oxígeno, para decidir en qué momento detener la corrida.

Mejoras:

- Proceso cómodo y eficiente de toma de datos.
- Graficación en pantalla del fenómeno en cuestión para aprovechamiento del estudiante
- Reducción del riesgo de confusión de corridas.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.3. Cambiar el sistema de tuberías

Propuesta y fundamento: Las tuberías utilizadas tienen distintos diámetros, lo que conlleva a colocación de accesorios innecesarios tales como reducciones, con la consecuente caída de presión. Además, esta se encuentra sostenida por medio de accesorios que no la fijan adecuadamente y la mantienen floja, además, también se sostiene de otras maneras inadecuadas como por ejemplo agujeros en una pantalla acrílica por donde pasa dicha tubería. Por lo anterior, se propone hacerla nueva y de un solo diámetro externo. Por otra parte, se propone la utilización de soportes de tubería fijados al marco del equipo.

Mejoras:

- Se evita caídas de presión innecesarias.
- Adecuado soporte de las tuberías.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.4. Cambiar la turbina de agitación

Propuesta y fundamento: La turbina utilizada es una turbina de paletas inclinadas, este tipo se caracteriza por proveer al fluido de movimiento vertical. Estas corrientes transportan a las burbujas rápidamente hasta la superficie del fluido, disminuyendo el tiempo de residencia de estas y con esto la transferencia de masa. Se propone colocar una turbina de paletas planas en lugar de paletas inclinadas, con el fin de proveer al agua movimiento radial y tangencial, y reducir el movimiento vertical del fluido, para con esto aumentar el tiempo de permanencia de las burbujas dentro del tanque y el ahorro de nitrógeno.

Adicionalmente, se recomienda que esta sea de un tercio del diámetro del tanque (la actual es de dos tercios) para mantener proporciones estándar de diseño, hecho que facilita el escalamiento en caso requerido, ya sea que el equipo se utilice para algún tipo de investigación, o como tarea didáctica como parte del reporte.

Mejoras:

- Aumento del tiempo de residencia de las burbujas para lograr con esto un ahorro de nitrógeno.
- Facilidad de escalamiento al conservar relaciones estándar con el tanque.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.5. Colocar mamparas en el tanque

Propuesta y fundamento: Las turbinas, ya sea de paletas planas o inclinadas, producen corrientes tangenciales que a altas velocidades originan remolinos, lo que provoca que el fluido gire a velocidades elevadas, pero con poco mezclado, en este caso de las burbujas. Por otra parte, un remolino tiene área expuesta en agitación por donde es posible una considerable transferencia de masa (Chain, 1952; Chisti, 1993), y ya que el objetivo de la práctica es el estudio de la transferencia debida específicamente al burbujeo del aire inyectado con flujo previamente medido, se debe minimizar la oxigenación por otras fuentes para evitar incurrir en errores. Por esta razón, se propone la colocación de mamparas de dimensiones estándar al tanque, para de esta manera mejorar la dispersión de las burbujas y la transferencia de masa desde estas, mientras se minimiza la debida al vórtice.

Mejora:

- Se aumenta el mezclado de las burbujas, con el fin de requerir menos nitrógeno y ahorro de este gas.

- Se reduce la oxigenación por métodos distintos al estudiado, lo que reduce errores no contemplados en los valores obtenidos.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.6. Cambiar el brazo que sostiene el motor:

Propuesta y fundamento: El brazo que sostiene el motor se encuentra soldado fijo y obliga a utilizar el tanque en un solo lugar distinto del centro de la mesa, lo que lleva a colocar los demás equipos necesarios para la realización del experimento en un espacio restringido. Se propone hacer un brazo que tenga tanto la capacidad de rotación, como la capacidad de estirarse o retraerse, con el fin de poder manipular la ubicación del tanque sobre la mesa, así como permitir el retiro o reemplazo de este en caso de ser necesario.

Mejora:

- Libertad de colocación del tanque según la necesidad, así como comodidad de trabajo.

Decisión acordada:

- Aprobado para su implementación

5.3.7. Tareas de mantenimiento

- Cambiar el tanque: Se considera que el tanque utilizado cumple satisfactoriamente con los requerimientos de diseño de un equipo de este tipo (salvo la ausencia de mamparas), inclusive, no se encontró una diferencia sustancial respecto al diseño del tanque del módulo comercial de Edibon, más que en su volumen, ya que este último es de 28 L mientras que el del laboratorio es de aproximadamente 5 L (un volumen pequeño requiere menor cantidad de nitrógeno para eliminar el oxígeno disuelto y permite corridas de menor duración, para no limitar la práctica con el tiempo y realizar las corridas que sean necesarias). Sin embargo, el tanque no

muestra el mejor aspecto físico, ya que el acrílico se encuentra deteriorado y con gran cantidad de incrustaciones, lo que le resta transparencia para la observación del mezclado, también, sus partes se encuentran unidas con grandes cantidades de pegamento, lo que también le resta transparencia y estética. Se recomienda fabricar un nuevo tanque con acrílico totalmente transparente para la mejor observación del fenómeno, manteniendo el diseño actual.

- Cambio de la superficie de trabajo: Se recomienda cambiar la superficie de trabajo compuesta por lámina de hierro y plástico acrílico, ya que dicha superficie se encuentra totalmente oxidada. Además, la lámina de acrílico sobre la metálica dificulta la eliminación de cualquier humedad que pudiera llegar a este punto, lo que agrava el problema de oxidación. Se propone cambiar esta por una nueva superficie de madera, ya que es barata, fácil de conseguir y de trabajar. Además, por su capacidad de mantenerse en buen estado y aspecto bajo un trabajo como el de servir de superficie.
- Pintado del marco del equipo: Si se cambia el brazo del motor, o si se añaden nuevas tuberías y nuevas maneras de sujetar estas, inevitablemente se tendrá que esmerilar, cortar o añadir piezas metálicas nuevas, por lo que se dañará la pintura y el aspecto de este equipo. Se recomienda una vez finalizados los arreglos a este módulo, la pintura de la totalidad del marco.

Capítulo 6

Diseño y construcción de las mejoras seleccionadas

6.1. Torre de pared húmeda

6.1.1. Columna principal

Se contó con disponibilidad de dos tubos de vidrio gracias a la donación de estos por parte del Taller de Óptica de la Universidad de Costa Rica. Las dimensiones originales de estos tubos se muestran a continuación:

Cuadro 3. Dimensiones originales de los tubos de vidrio donados por el Taller de Óptica de la Universidad de Costa Rica

Tubo	Longitud (m)	Diámetro externo (m)	Diámetro interno (m)
Tubo 1	1.00	0.036	0.032
Tubo 2	0.90	0.028	0.025

Para la columna principal se utilizó el Tubo 1, mientras que el Tubo 2 para la columna secundaria, por varias razones:

- La columna secundaria debe colocarse por debajo de la principal para transferirle la corriente de aire ascendente por lo que la inferior debe ser de igual diámetro o menor, de lo contrario, parte de la corriente de aire no entrará en la columna superior.
- Una columna inferior de menor diámetro tiene la ventaja de que disminuye la probabilidad de que parte del agua descendente caiga dentro de esta.

El Tubo 1 se llevó al Taller de Soplado de Vidrio de la Facultad de Química, donde se amplió uno de sus extremos para darle forma de campana, con el fin de desviar el agua hacia el depósito y evitar que caiga en la columna secundaria. Para la construcción de esta campana,

se necesitó moldear 0.03 m de dicho tubo, por lo que la distancia de la sección recta, o sección para la transferencia de masa resultó de 0.97 m de largo. En la construcción de la campana, las dimensiones de esta fueron totalmente dependientes de la trabajabilidad del vidrio. Según el encargado de dicha tarea, dicho extremo se amplió el máximo posible sin comprometer la integridad del vidrio, ya que de haberlo estirado más, este resultaría muy delgado y podría romperse inclusive durante dicho proceso.

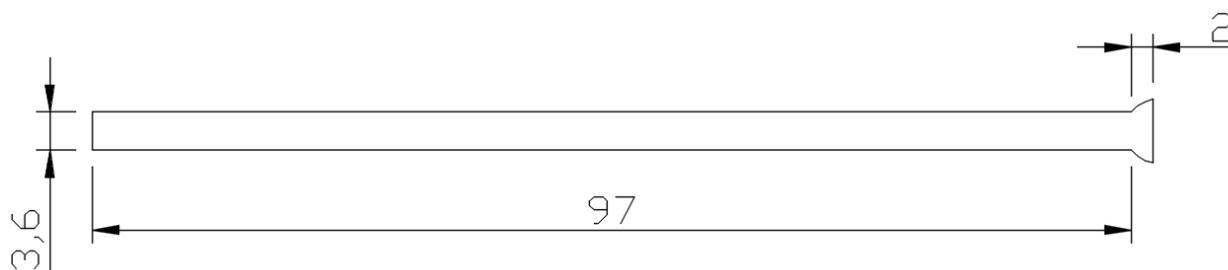


Figura 34. Diagrama de la columna principal (Medidas en centímetros, elaboración propia).

Habiendo definido las dimensiones de la columna por criterio de disponibilidad y construcción, resta demostrar si el Tubo 1 es adecuado para ser utilizado como columna principal del módulo de pared húmeda. Para esto es necesario referirse al objetivo buscado en el laboratorio con dicha práctica, el cual es encontrar el coeficiente de transferencia de masa desde la fase líquida a la fase gaseosa. Ya que no se busca un valor de humidificación en específico, las dimensiones de la columna deben ser tales que maximicen la calidad del experimento.

De acuerdo a lo anterior, un aspecto importante a tomar en cuenta es la calidad de la medición de humedad relativa (precisión). Como se verá más adelante, esta medición se realizará mediante sensores del fabricante Sensirion, modelo Sht85; los cuales presentan la mayor precisión ($\pm 1.5\%$) en el rango de 0 % a 80 % de humedad relativa. Por encima del valor de 80 %, la precisión es de $\pm 2\%$. Si se utiliza la obtención de mediciones de la máxima precisión posible como criterio para seleccionar la longitud de la columna principal, esta

debe ser de una longitud tal que logre una humidificación menor al 80 % de humedad relativa.

El Cuadro 4 muestra los datos recolectados en la operación de la torre de pared húmeda del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, realizada bajo condiciones normales de operación de acuerdo a la guía de laboratorio.

Cuadro 4. Datos medidos en el experimento de torre de pared húmeda.

Flujo de aire (L/min)	Humedad relativa de entrada (%)	Humedad relativa de salida (%)
90	33.10	76.00
70	32.15	77.45
50	27.35	70.30
30	41.00	67.55
20	42.05	66.50

Se puede observar que con la columna anterior, para todo el rango de flujo de aire se obtenían valores menores al 80 % de humedad relativa en la corriente del aire de salida, por lo que bajo el criterio antes mencionado, el área interna de dicha columna se considera adecuada. Dicha columna poseía un diámetro interno de 0.028 m y una longitud de 1.10 m, por lo que el área interna correspondía a

$$A = \pi \cdot D_{in} \cdot L = \pi \cdot 0.028 \text{ m} \cdot 1.10 \text{ m} = 0.0968 \text{ m}^2 \quad (38)$$

Si se compara con la nueva columna, que posee 0.032 m de diámetro interno y 0.97 m de longitud, se obtiene un área de

$$A = \pi \cdot D_{in} \cdot L = \pi \cdot 0.032 \text{ m} \cdot 0.97 \text{ m} = 0.0975 \text{ m}^2 \quad (39)$$

donde

D_{in} : Diámetro interno, m

L : Longitud de la columna, m

Lo que corresponde a un 0.7 % de diferencia respecto del área interna de la anterior columna.

Resulta de importancia hacer la anotación de que con un diámetro de columna mayor, el número de Reynolds de la corriente gaseosa disminuye. Sin embargo, es sabido que en este fenómeno la transferencia de masa está controlado por la fase gaseosa (Geankoplis, 2006), y según McCabe (2007), para un fenómeno con estas características si se desea aumentar la transferencia de masa, se debe aumentar la turbulencia de la corriente gaseosa. Por el contrario, dicha turbulencia se está disminuyendo, el aumento en el diámetro de columna respecto al anterior no entra en conflicto con el criterio de diseño.

Ya que todas las demás variables de interés del experimento se mantienen constantes, y con un área interna de la columna similar a la anterior, se puede suponer que la corriente de aire de salida tendrá condiciones similares a las anteriores, lo que resulta beneficioso ya que operará los sensores a su máxima precisión de operación.

Bajo este criterio, no es necesaria una columna de mayor longitud; por otra parte, tampoco hay criterio para reducir la longitud de esta, por lo que el Tubo 1 se considera adecuado para ser utilizado como columna principal.

6.1.2. Torre secundaria inferior

La columna inferior, o columna de estabilización del aire de entrada, no requiere ser de gran tamaño, y su única función es introducir el aire en la columna principal de una forma estable. Cengel y Cimbala (2006) afirman que los efectos de entrada se vuelven insignificantes a una longitud de 10 diámetros de tubería. Ya que el Tubo 2 tiene un diámetro interno de 0.025 m, la distancia mínima que esta columna debe poseer para estabilizar el aire, es de 0.25 m. Como ya se mencionó, es indiferente si la columna mide más que la distancia calculada, por lo que se decide cortar el Tubo 2 a 0.30 m de longitud, dimensión que facilitará la colocación y sujeción de esta al marco del equipo.

6.1.3. Depósitos de agua

Tanto en el extremo superior como en el inferior de la columna, se encuentran dos depósitos fabricados en acrílico, por donde se introduce y se extrae el agua respectivamente. Estos son redondos y están fabricados en tubo acrílico de 0.15 m de diámetro, mismo material utilizado para la construcción del tanque agitado. El depósito inferior tiene como única función extraer el flujo de agua del sistema, por lo que no se requieren consideraciones detalladas para su diseño, sin embargo, el superior debe estabilizar el flujo para introducirlo en la columna principal.

6.1.3.1. Depósito superior

Como se verá más adelante, el flujo máximo de agua recomendable para operar dicho equipo es de 3000 mL/min, por lo que se comprobará si un depósito de dichas dimensiones es capaz de estabilizar el flujo de agua, utilizando el número de Reynolds como criterio.

Este recipiente tiene 0.146 m de diámetro interno, además tiene introducida la columna principal de 0.036 m de diámetro externo, por lo que, el área transversal por la que ascenderá el flujo de agua corresponde a la sección anular entre estos dos objetos. El área para una sección anular corresponde a

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{in D}^2 - D_{ex c}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot ((0.146 \text{ m})^2 - (0.036 \text{ m})^2) = 0.0158 \text{ m}^2 \quad (40)$$

donde

A : Área anular, m^2

$D_{in D}$: Diámetro interno del depósito, m

$D_{ex c}$: Diámetro externo de la columna, m

Por lo que la velocidad de ascensión del agua está dada por

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.00005 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0158 \text{ m}^2} = 0.0032 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (41)$$

donde

v : Velocidad de ascensión del agua, m s^{-1}

\dot{V} : Flujo volumétrico, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$

El diámetro hidráulico para una sección anular está dado por la Ecuación (42)

$$D_h = D_{in D} - D_{ex c} = 0.146 - 0.036 = 0.110 \text{ m} \quad (42)$$

donde

D_h : Diámetro hidráulico, m

Por lo que el número de Reynolds resulta de

$$Re = \frac{\rho \cdot D_h \cdot v}{\mu} = \frac{998.2019 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.110 \text{ m} \cdot 0.0032 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.001006 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 350.5 \quad (43)$$

donde

μ : Viscosidad del agua a 20 °C, $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

ρ : Densidad del agua a 20 °C, kg m^{-3}

Por lo anterior se comprueba que operando a máximo flujo, este aún se encuentra en régimen laminar, por lo que se considera que dichas dimensiones son adecuadas para la estabilización del agua de entrada en el depósito superior.

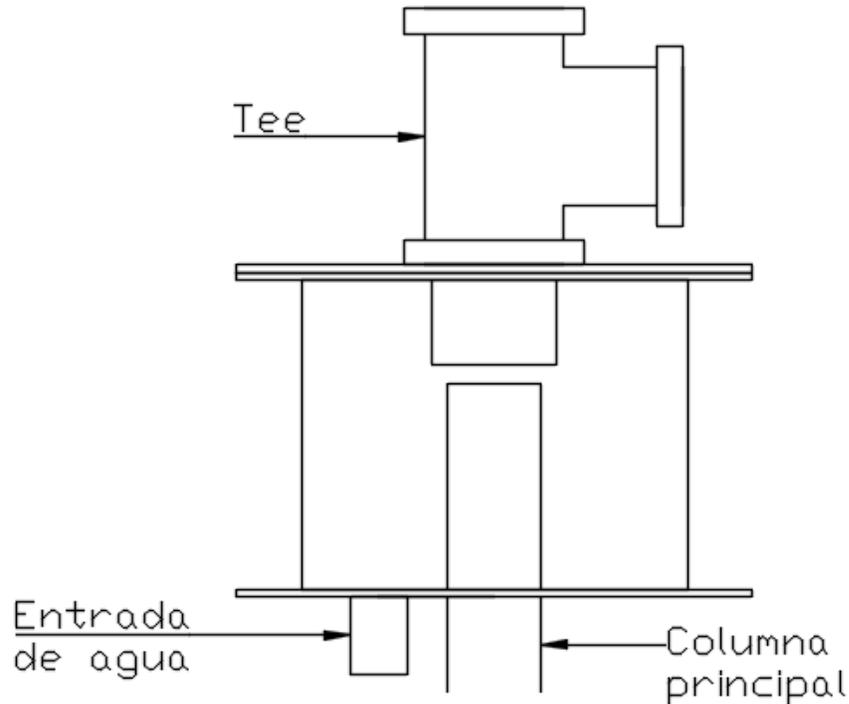


Figura 35. Diagrama del depósito superior (Elaboración propia).

Dicho recipiente contiene la entrada de agua en su parte inferior, además, en su tapa posee una sección de tubería encargada de dirigir el aire de salida hacia la atmósfera, para evitar que este permanezca dentro y haya transferencia de masa adicional antes de que se realice la medición de humedad relativa del aire de salida. En el extremo de esta sección de tubería se acopla una “T” para la introducción del sensor de humedad relativa.

6.1.3.2. Depósito inferior

Como se dijo anteriormente, el depósito inferior no necesita consideraciones especiales de diseño, por lo que tiene iguales dimensiones que el depósito superior y únicamente cuenta con las entradas de las columnas, así como una tubería para extraer el agua del sistema.

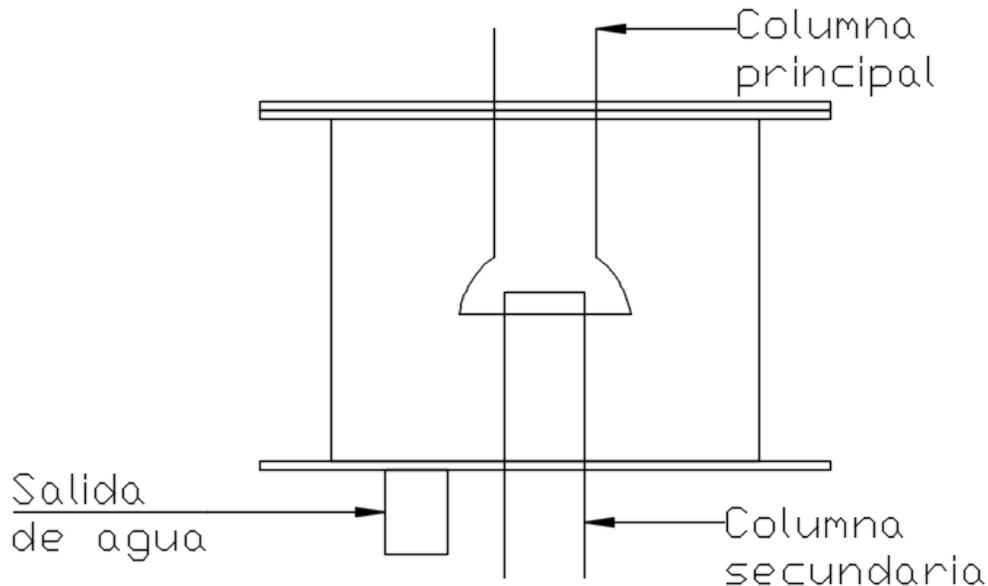


Figura 36. Diagrama del depósito inferior (Elaboración propia).

6.1.4. Automatización de la toma de datos

Para esta tarea se utilizó como base una placa Computadora Raspberry Pi 3. Se seleccionó esta placa sobre otras tales como Arduino, por su memoria y capacidad de almacenamiento de datos, ya que fácilmente se puede conectar un dispositivo USB con el fin de extraer los datos medidos. Para la medición de humedad relativa y temperatura del aire de entrada y salida de la columna, se utilizaron sensores Sensirion Sht85, los cuales tienen una resolución de 0.01 % para la humedad relativa y 0.01 °C para la temperatura, mientras que la precisión es de ± 1.5 % en la humedad relativa y 0.1 °C en la medición de humedad. El sensor que mide las condiciones de entrada del aire se encuentra ubicado en la columna secundaria inferior, mientras que el que mide las condiciones de salida se encuentra en la "T" de tubería, en el depósito superior.



Figura 37. Interior del equipo central de medición de datos.

Por otra parte, para la medición de la temperatura del agua a la entrada y salida, se utilizó sensores DS18B20, el cual posee una resolución de $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precisión de medida de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El sensor que mide las condiciones de entrada del agua se encuentra ubicado en una “T” de tubería, justo en la entrada al depósito superior, mientras que el que mide las condiciones de salida se encuentra en la tubería, justo a la salida del depósito de agua inferior.

Además, se utilizó un sensor de presión atmosférica BMP180, el cual cuenta con una resolución de 0.01 hPa y una precisión de $\pm 0.1\text{ hPa}$. Dicho sensor se encuentra dentro de la caja de circuitos.

Al ejecutar el programa, los datos medidos se grafican en tiempo real con el fin de que el estudiante visualice de una manera más ilustrativa, el momento en el que se alcanza el estado estacionario luego de cada cambio en las condiciones de operación. Al mismo tiempo, se crea una hoja de cálculo con el nombre seleccionado por el usuario, en donde se registran las variables antes mencionadas respecto a la duración del experimento, así como las mediciones de los rotámetros de agua y aire introducidas por el usuario. Al detener el

experimento, dicha hoja de cálculo se guarda en la memoria de la Raspberry Pi, desde donde se puede exportar a un dispositivo USB.

6.1.5. Rotámetro y bomba de agua

Para dimensionar la bomba y el rotámetro de agua se debe conocer el flujo de agua que requerirá el equipo. Para esto se usa como criterio que la película de agua en la columna principal debe ser laminar, de acuerdo al principio de operación de una torre de pared húmeda. Es decir, se debe averiguar el rango de flujos en los que el número de Reynolds sea de 2000 o menor.

Como se describió en la Ecuación (12), el número de Reynolds para una película descendente se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot \rho}{\pi \cdot D_{in} \cdot \mu}$$

Donde

Re : Número de Reynolds, adim

\dot{V} : Flujo volumétrico, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

ρ : Densidad del agua, kg m^{-3}

D_{in} : Diámetro interno de la columna, m

μ : Viscosidad del agua, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$

Por lo que para un número de Reynolds de 2000, se obtiene un valor de flujo de

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D_{in} \cdot \mu \cdot Re}{4 \cdot \rho} = \frac{3.14 \cdot 0.032 \text{ m} \cdot 0.001006 \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \cdot 2000}{4 \cdot 998.2019 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \quad (44)$$

$$\dot{V} = 0.0000507 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 3039 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Para el cálculo anterior se utilizaron las propiedades del agua a 20 °C.

En el laboratorio se cuenta con disponibilidad de rotámetros de $3000 \text{ cm}^3/\text{min}$, por lo que se utilizará uno de estos. Por otra parte, se consultó opciones de compra en el mercado nacional, de bombas que tuvieran la capacidad de proveer este flujo, sin embargo, no se encontró una opción adecuada para el montaje en el marco del equipo y conexión con tuberías; únicamente existía opción de bombas para fuentes de jardín, las cuales eran de elevado costo. Por esta razón, se decidió utilizar una de las tres bombas de 373 kW (0.5 HP) disponibles en el laboratorio.

Ya que según el fabricante, esta bomba es capaz de trasegar hasta $35 \text{ L}/\text{min}$, se debe regular el flujo por medio de válvulas para suministrar a la columna únicamente el requerido para el experimento, que será de máximo $3 \text{ L}/\text{min}$. Debido a que el flujo utilizado para la práctica es solo una pequeña parte del total que puede otorgar la bomba, colocar una única válvula a la salida de esta para regularlo, haría que la bomba trabajara casi a descarga cerrada. Para evitar forzar la bomba o dañarla a largo plazo, se construyó un retorno de agua al tanque con el fin de que la bomba trabaje sin obstrucción (válvula casi cerrada) a máxima capacidad, mientras que se desvía hacia el rotámetro sólo el flujo requerido. El diagrama ilustrativo de esta idea puede observarse en la Figura 38.

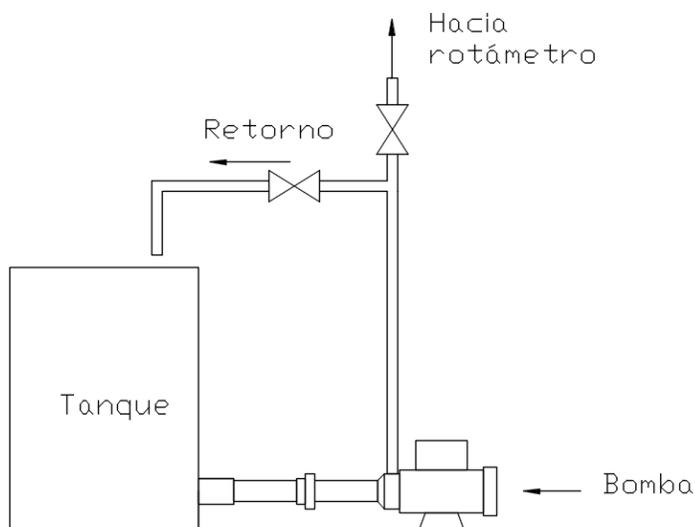


Figura 38. Diagrama del retorno de agua al tanque (Elaboración propia).



Figura 39. Retorno de agua al tanque.

6.1.6. Cambio del reservorio de agua

El reservorio de agua no necesitó algún diseño o consideraciones detalladas, por lo que, se aprovechó un tanque de agua de acero inoxidable que se encontraba en desuso. Sin embargo, sí fueron necesarias ciertas modificaciones con el fin de acondicionarlo para su nuevo uso.

Originalmente, las dimensiones de este tanque correspondían a 0.30 m por 0.40 m de base y 0.50 m de altura y se encontraba completamente cerrado, con varias adaptaciones para conexión de tuberías. La primera necesidad fue cortarlo, de modo que este tanque quedara abierto, ya que por ahí entrarían tuberías de agua. La dimensión de 0.50 m se redujo a 0.42 m, debido a que este valor en específico facilitaría la colocación y fijación de este al marco del equipo, ya que el borde del tanque coincide con una sección del marco, donde se puede atornillar y fijar.

La segunda modificación fue la soldadura de una unión donde se pudiera conectar tubería adecuada para la succión de la bomba, ya que el tanque sólo contaba con una entrada para tubería de 0.0171 m (3/8 de pulgada nominal). El fabricante de la bomba recomienda que la tubería de succión siempre debe ser igual o de mayor diámetro que la tubería de

descarga, por lo que se decidió utilizar tubería de las dimensiones preestablecidas en la fabricación de la bomba, es decir, de 0.0334 m (1 pulgada nominal). Esta unión se soldó a 0.062 m de la base del tanque, de modo que correspondiera con la altura de la entrada de la bomba.



Figura 40. Tanque previo a las modificaciones.

6.1.7. Tratamiento del agua y limpieza de la columna al terminar el bloque de prácticas

Para evitar la incrustación de dureza del agua tanto en la columna principal, como en los depósitos del agua se consideró varias opciones:

- Tratar el agua utilizada con un reductor de dureza
- Lavar el equipo luego de cada bloque de prácticas con una sustancia libre de dureza
- Utilizar agua destilada para realizar el experimento

El primer punto tiene el inconveniente de requerir mantenimiento constantemente y la necesidad de una sustancia extra con un costo económico asociado. Por otro lado, para el segundo punto se consideró el uso de alcohol o agua destilada para tal fin por ser sustancias con disponibilidad en el laboratorio. Sin embargo, el alcohol resultó inadecuado, ya que esta sustancia ataca al acrílico, ocasionándole grietas a muy corto plazo.

Ya que la opción más viable es limpiar con agua destilada, se decidió realizar el experimento completo con esta sustancia en lugar de simplemente limpiar el equipo al finalizar la práctica, por varias razones en específico, las cuales se explican a continuación:

- Realizar el experimento con agua normal y lavarlo con agua destilada al final del bloque de prácticas, implica que durante todo el semestre el equipo estuvo en contacto con la dureza que puede formar incrustaciones.
- Realizar el lavado al finalizar cada práctica tiene alta carga de mantenimiento y utilización de gran cantidad de agua destilada.
- Realizar la práctica con agua destilada disminuye la necesidad de mantenimiento, elimina el contacto del equipo con agua con dureza y disminuye la cantidad necesaria de agua destilada necesaria, ya que se debe llenar el reservorio de agua una sola vez al semestre.

6.2. Torre de enfriamiento

6.2.1. Aumentar la potencia de calentamiento inicial

Como se puede observar en el Cuadro 1, la potencia requerida para operar ambas torres de enfriamiento debe ser de al menos 30 kW. Para llevar a cabo el aumento de potencia se consideró varias opciones.

- Calentadores eléctricos de línea de tipo doméstico
- Calentadores eléctricos con tanque reservorio domésticos
- Resistencia eléctrica única de 30 kW

Calentadores eléctricos de línea de tipo doméstico

Estos calentadores presentan el inconveniente de que poseen valores de potencia promedio entre 10 kW y 12 kW, por lo que resulta insuficiente para el objetivo de la práctica. Además, estos dispositivos tienen costos alrededor de los 200 000 y 350 000 colones.

Calentadores eléctricos con tanque reservorio domésticos

Estos tienen el inconveniente que trabajan a potencias sumamente bajas respecto a la requerida en el laboratorio, de alrededor de 3.5 kW, ya que estos al poseer un reservorio, son capaces de almacenar agua caliente para su posterior uso. No se consideran adecuados ya que el volumen de agua almacenada solo sería suficiente para una corrida en la práctica y posterior a eso habría que esperar un largo tiempo a que vuelva a calentar.

Resistencia eléctrica única de 30 kW

Se consideró la mejor opción, ya que se puede fabricar exactamente para adaptarse a la necesidad de potencia requerida, por un precio menor que las demás opciones. Para esto, se cotizó una resistencia en la empresa Electro MAZ, dando como parámetros de diseño los siguientes:

- Potencia de 30 kW: Valor requerido
- De 220 V: Valor de tensión disponible en el laboratorio
- Para calentamiento de agua limpia pero no potable: Se debía especificar al fabricante en qué tipo de fluido se utilizaría, la cual es agua sin presencia de salinidad u otras sustancias corrosivas, pero que al mismo tiempo no es agua potable, lo que elimina la necesidad de materiales de alto costo como acero inoxidable.
- Sin sistema de control de temperatura incluido: Ya que el laboratorio cuenta con el que utiliza la resistencia instalada.

Como resultado, dicha empresa cotizó una resistencia con las siguientes características:

- Longitud mínima de 0.8 m.
- Ensamblada en una brida para tubería de 0.1143 m (4 pulgadas nominal)
- Costo: 155 000 colones.

6.2.2. Depósito para el calentamiento del agua

Según lo acordado en la reunión de discusión de la lista de mejoras, no se construiría un tanque de mayor área transversal para corregir las fugas por ser una solución de alto costo para un problema que se podría solucionar de formas más sencillas. Sin embargo, se hizo necesaria la construcción de un tanque de mayor tamaño que el utilizado por otra razón, ya que la resistencia cotizada tenía una longitud mínima (0.80 m) mayor que la longitud del tanque (0.75 m). Este tanque debía poseer un marco que le diera soporte, además de ruedas para facilitar su transporte.

Ya que esto era construir un tanque similar al utilizado pero de mayor tamaño, en este punto se hizo la observación de que existían dos opciones; volver a la idea original de construir un tanque de mayor área transversal bajo la torre, con el fin de contener la nueva resistencia y además corregir el problema de las fugas, o construir un tanque de calentamiento aparte, de las dimensiones adecuadas para contener la resistencia. Esto hacía necesaria la utilización de una segunda bomba, la primera para transportar agua fría del depósito de la torre hacia el tanque de calentamiento, y la segunda para llevar agua caliente del último hacia lo alto de la torre, ambas con su respectivo sistema de tuberías.

Por esta razón, mediante acuerdo con el profesor director y por un criterio de costo, se descartó construir un tanque adicional para calentamiento, y más bien, volver a la idea original de construir un reservorio para la torre, de mayor tamaño, con una adaptación para la colocación de la nueva resistencia.

Diseño del tanque

Las dimensiones de la base del tanque debían ser las menores que alojaran la resistencia y atraparan el flujo de agua descendente, con el fin de reducir su costo. Como límite inferior se tenía que debía ser de 0.8 m, longitud de la resistencia. Además, mediante observación de la torre en funcionamiento se determinó que las fugas no salpicaban a más de 0.05 m de

la torre aproximadamente, por lo que una base cuadrada de 1 m resultaría adecuada (recordar que la base de la torre es cuadrada de 0.75 m).

Con respecto a la altura de la base, se decidió mantener la misma, con el fin de no aumentarla y con esto requerir colocar la torre a una mayor altura; equipo de gran tamaño, para evitar que los estudiantes tengan que tomar mediciones aún más arriba. Por otra parte, se consideró inadecuado una altura del tanque menor a la utilizada, ya que resultaría difícil la colocación de la resistencia en tan poco espacio, y esta podría quedar sin sumergirse por completo.

Para la construcción de este tanque se utilizaría una lámina de acero A-36 con un espesor de 4.76 mm (3/16 de pulgada), recomendado por el ingeniero mecánico y profesor de la Universidad de Costa Rica, Rodolfo Soto Urbina. Sería cortado en el Taller de Ingeniería Mecánica mediante cortadora de plasma y soldado en el mismo lugar.

Por otra parte, para la base de la torre se mantuvo el diseño utilizado, así como materiales y espesores, variando únicamente las dimensiones para colocar en su interior el nuevo tanque. Estaría construida con angular de acero A-36 de 0.05 m por 0.05 m, en un espesor de 4.76 mm (3/16 de pulgada), tendría un ancho de 1.16 m, una profundidad de 0.1 m y una altura de 0.45 m. Además, en su parte superior tendría dos piezas de angular separadas 0.72 m, sobre las que se montaría la torre. Se consultó con el profesor Rodolfo Soto Urbina acerca del diseño y materiales de esta base, los cuales aprobó y consideró adecuados.

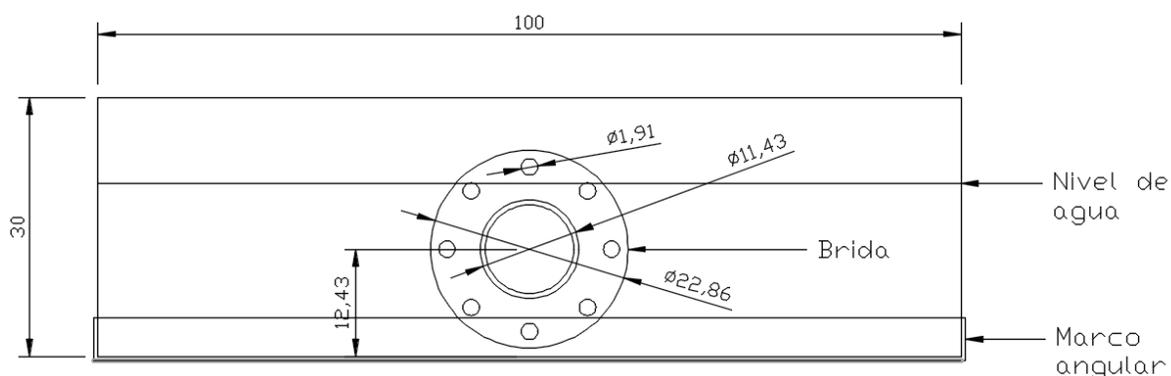


Figura 41. Vista frontal del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia).

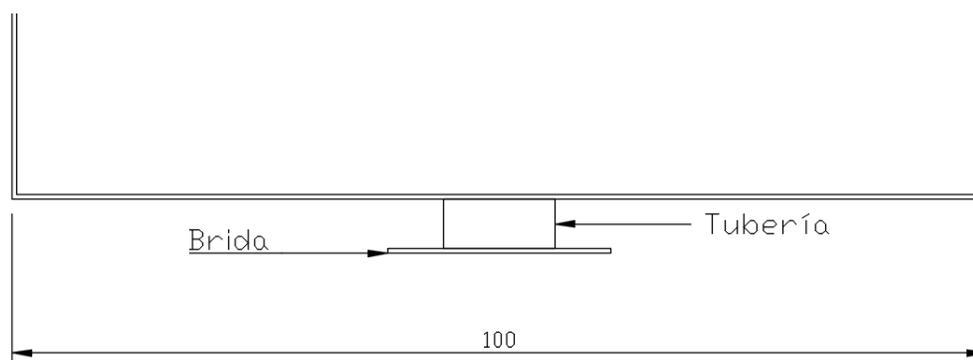


Figura 42. Detalle de la vista superior de la conexión por brida (Medidas en centímetros, elaboración propia).

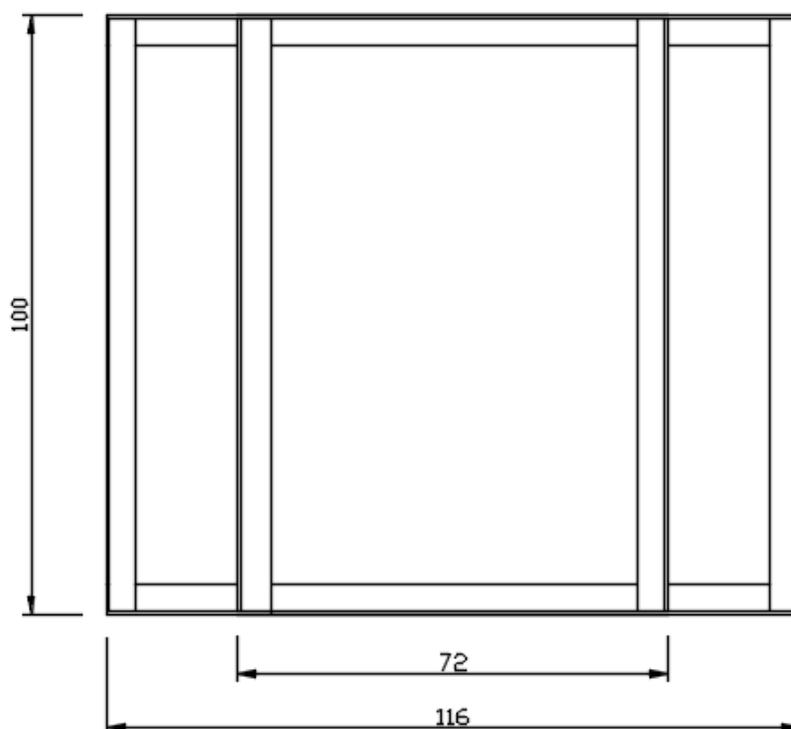


Figura 43. Vista superior de la base para la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).

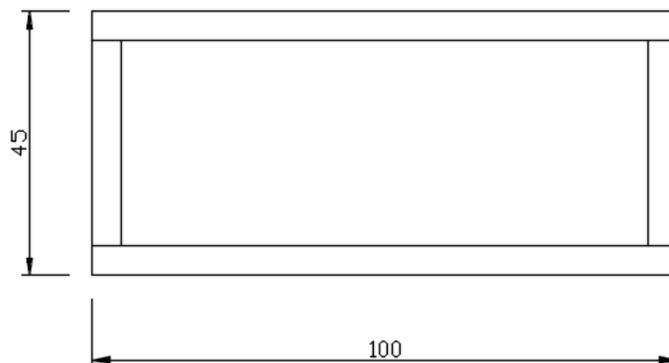


Figura 44. Vista lateral de la base para la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).

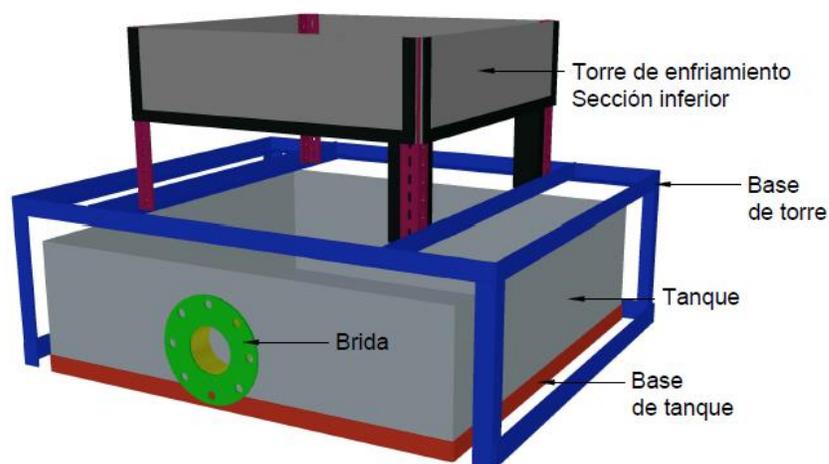


Figura 45. Ilustración de la base para la torre de enfriamiento (Elaboración propia).

Para finalizar, se consultó con el ingeniero eléctrico y profesor de la Universidad de Costa Rica, Osvaldo Fernández Cascante, acerca de la instalación de la resistencia eléctrica y calibre de cable adecuado para realizar la conexión. Sin embargo, este profesor advirtió de que la corriente necesaria para operar una resistencia eléctrica de 30 kW a 220 V, es de 136 A, la cual es mucho mayor que lo que la red del laboratorio puede soportar. Basándose en la Tabla 310-16 del Código Eléctrico Nacional (NEC), explicó que el cable adecuado para operar dicha corriente es el cable calibre 2/0 AWG, el cual es de gran tamaño, y no solo la resistencia eléctrica debe estar conectada mediante este cable, sino que todo el ramal del

laboratorio a la que esta esté conectada debe poseer un calibre igual o mayor. Por otra parte, no solo se debería colocar el cable de dicho calibre, sino también un disyuntor (breaker) para dicha corriente.

Debido a que el laboratorio no cuenta con la capacidad para operar esta resistencia, ni se tiene la potestad de realizar modificaciones a la red, se consideró inviable el uso de una resistencia de 30 kW para el calentamiento del agua para la torre de enfriamiento. Además, se vuelve innecesaria la construcción de un tanque y base para dicha torre.

Debido a lo anterior, se consideró como única alternativa el calentamiento del agua utilizando el serpentín de vapor con el que contaba anteriormente este equipo, sin embargo, esta opción tampoco es viable por el momento, ya que aunque el laboratorio cuenta con tubería de vapor, aún no cuenta con tubería de retorno de condensados. Ya que no se cuenta con la potestad de construir esta tubería por cuenta propia, se concluye que este método es temporalmente inviable.

6.2.3. Cambio del rotámetro

Por medio de corridas experimentales, se calibró el rotámetro que originalmente tenía el equipo. Para esto se recolectó un volumen de agua en una probeta mientras se midió el tiempo de este proceso con un cronómetro, datos con los cuales se calculó el flujo para varios valores del rotámetro. Estos datos se muestran a continuación.

Cuadro 5. Datos medidos para la calibración del rotámetro.

Lectura del rotámetro	Volumen recolectado	Tiempo	Flujo	Flujo	Flujo promedio
(%)	(L)	(s)	(L/s)	(L/min)	(L/min)
10	1760	14.96	0.118	7.06	
10	1780	13.54	0.131	7.89	7.57
10	1860	14.38	0.129	7.76	
25	1780	4.41	0.404	24.22	
25	1840	4.72	0.390	23.39	23.36
25	1840	4.91	0.375	22.48	

Cuadro 5 Continuación. Datos medidos para la calibración del rotámetro.

Lectura del rotámetro	Volumen recolectado	Tiempo	Flujo	Flujo	Flujo promedio
(%)	(L)	(s)	(L/s)	(L/min)	(L/min)
40	1580	2.29	0.690	41.40	
40	1740	2.64	0.659	39.55	39.37
40	1580	2.55	0.620	37.18	

Del Cuadro 5, el valor del rotámetro de 40 % correspondió al máximo flujo que la bomba fue capaz de proveer. Por esta razón, se decidió colocar un rotámetro de 40 L/min (10 gal/min), correspondiente a la totalidad del rango de flujos que la bomba es capaz de entregar.

Ya que en el laboratorio no se contaba con un dispositivo con estas especificaciones, se compró el rotámetro del fabricante Cole Parmer, modelo EW-32470-04, el cual cumple con las características deseadas. Este se instaló y se colocó también una válvula de globo a la salida del rotámetro para regular el flujo de trabajo de la torre.

6.2.4. Cambiar el sistema de aspersión de agua

El objetivo del aspersor de agua en la torre de enfriamiento es la distribución uniforme del agua en el área transversal de la torre. Se consideró la opción de utilizar aspersores similares a los de sistemas contra incendios, pero estos presentan el inconveniente de que extienden el cono en una gran área, por lo que el agua chocaría contra las paredes de la torre. Otra opción disponible fueron los rociadores tipo niebla, sin embargo, estos podrían ocasionar problemas de arrastre en la torre de enfriamiento.

Por lo tanto, se decidió utilizar un rociador de tubos perforados, ya que estos cumplen con el objetivo de distribuir uniformemente el flujo en el área disponible. Además, este flujo se expulsa de manera vertical, evitando el problema de los rociadores tipo cono; por otra parte, este está formado por chorros, disminuyendo el problema de arrastre.

Perry y Green (2008) presentan consideraciones importantes y una metodología de cálculo sencilla para el diseño de un tubo perforado con distribución de flujo constante en sus agujeros. Tiene la ventaja de que el flujo por cada uno de estos agujeros será constante independientemente de si se varía la magnitud del flujo bombeado, es decir, el diseño de un rociador basado en estos cálculos no está optimizado para un solo valor de flujo, sino que este se puede variar.

En un tubo perforado, si los efectos inerciales del flujo y la recuperación de presión estática dominan sobre la caída de presión por fricción, el flujo tenderá a salir mayoritariamente por los agujeros del extremo final. Si por el contrario domina la caída de presión por fricción sobre la recuperación de presión estática, el flujo tenderá a salir mayoritariamente por los agujeros más cercanos a la alimentación. Si se desea un flujo uniforme por cada agujero, se debe hacer un balance entre ambos efectos.

Para una distribución uniforme y suponiendo un factor de fricción constante, el efecto combinado de caída de presión por fricción y recuperación de presión estática se da por medio de la fórmula

$$\Delta p = \left(\frac{4 \cdot f \cdot L}{3 \cdot D} - 2 \cdot K \right) \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} \quad (45)$$

donde

Δp : Caída de presión neta a lo largo de la tubería, Pa

L : Longitud de la tubería, m

D_{in} : Diámetro interno de la tubería, m

f : Factor de fricción de Fanning, adim

v_e : Velocidad del fluido a la entrada de la tubería, m s⁻¹

ρ : Densidad del fluido, kg m⁻³

K : Factor adimensional, adim

Donde el factor K, presenta un valor de 0.5 para un dispositivo de este tipo (distribuidor de descarga).

La manera de obtener una distribución uniforme es haciendo que la caída de presión a través de los agujeros sea relativamente grande comparada con la caída a lo largo del tubo (Perry y Green, 2008), así la variación en caída de presión, como en flujo, será pequeña para cada perforación. La caída de presión en el agujero puede ser expresada en términos del coeficiente de descarga C_o y la velocidad a través de la perforación v_o por la fórmula siguiente, donde C_o se puede aproximar al valor de 0.62

$$\Delta p_0 = \frac{1}{C_o^2} \frac{\rho \cdot v_o^2}{2} \quad (46)$$

donde

Δp_0 : Caída de presión a través del agujero, Pa

v_o : Velocidad del fluido a través del agujero, $m \cdot s^{-1}$

ρ : Densidad del fluido, $kg \cdot m^{-3}$

C_o : Coeficiente de descarga, adim

Perry y Green (2008) presentan además el porcentaje de distribución desigual, definido como la variación porcentual en flujo entre el primer y último agujero, de la forma

$$\text{Porcentaje de distribución desigual} = 100 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta p_0 - |\Delta p|}{\Delta p_0}} \right) \quad (47)$$

Para lo anterior, se utiliza como valor común de diseño un 5 % de distribución desigual. Combinando estas ecuaciones, se obtiene la ecuación de diseño siguiente

$$\frac{v_o}{v_e} = \frac{A_t}{A_{T_o}} = \sqrt{10} \cdot C_o \quad (48)$$

donde

A_t : Área transversal de la tubería, m^2

A_{T_o} : Área total de los agujeros, m^2

C_0 : Coeficiente de descarga, adim

Para el diseño del rociador, se debe elegir primero cuántas ramas tendrá, ya que la metodología de cálculo presentada, únicamente determina el diámetro de la perforación y la separación entre cada agujero para un único tubo. Para determinar este dato, se consideró primero de qué forma se iba a alimentar dicho dispositivo, de manera que el flujo fuera el mismo para cada rama.

Se determinó que la mejor manera de lograr esto fue mediante un rociador de cuatro ramas, esto ya que, mediante el arreglo de tuberías mostrado en la Figura 46, es posible la construcción de un sistema de alimentación simétrico, con lo que se puede suponer que el flujo será el mismo para cada rama. Este arreglo de tuberías para la alimentación, representado mediante la letra "X" en la Figura 46, es posible colocarlo sobre el borde de la torre, donde no hay rejillas. Si por el contrario se construyera un rociador de seis ramas, la longitud "X" aumentaría, cubriendo área efectiva de rejillas y ocasionando que el flujo no sea uniformemente distribuido por toda el área de la torre.

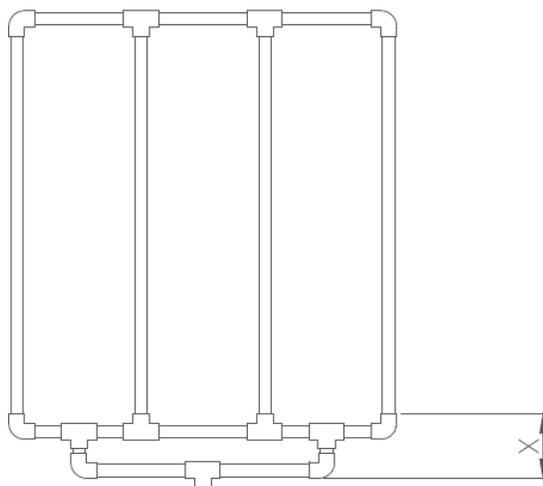


Figura 46. Diagrama de un aspersor de cuatro ramas (Elaboración propia).

Lo siguiente sería elegir la cantidad de perforaciones que tendría cada tubo, para esto, siempre basándose en el criterio de distribución uniforme. En la Figura 47 se muestra el rociador, colocado sobre un cuadrado de 0.64 m correspondiente al área transversal cubierta por rejillas. Esta se divide en una cuadrícula de 4 por 4 subdivisiones cuadradas de 0.16 m, para que cada tubo se encuentre ubicado en el centro de cada subdivisión. Ya que el tubo se encuentra a 0.8 m del inicio de las rejillas, si se desea distribuir el flujo uniformemente, los agujeros deben empezar a construirse también a 0.8 m del inicio de estas; por esta razón, la totalidad de los agujeros deben realizarse en un tramo de 0.48 m de longitud. Se determinó que es posible colocar 10 agujeros uniformemente distribuidos a lo largo de este tramo de tubería, en la que cada subdivisión distinta a las extremas contaría con tres agujeros, mientras que las de los extremos contarían con dos, ya que el hipotético tercer agujero iría en la separación entre el final de tubería y el borde de las rejillas.

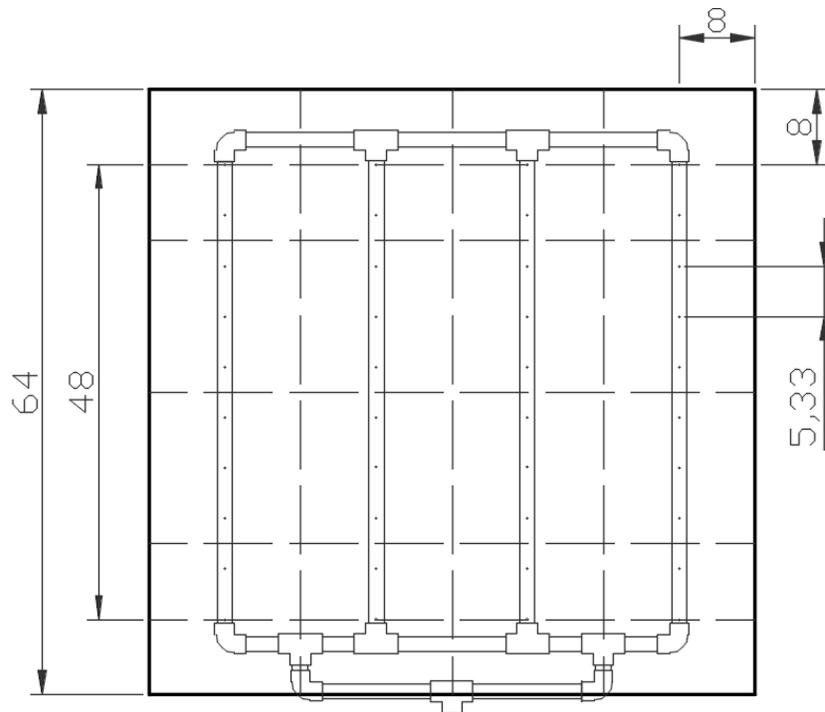


Figura 47. Distribución del rociador sobre el área de rejillas de la torre de enfriamiento (Medidas en centímetros, elaboración propia).

Por otra parte, como material para su construcción se eligió tubo de policloruro de vinilo clorado o CPVC (PVC para agua caliente) por las condiciones de temperatura del flujo en cuestión, además por la facilidad de trabajar con este material. Por otra parte, se eligió tubo de 0.0159 m de diámetro externo (1/2 pulgada nominal) debido a que este método está desarrollado para condiciones de entrada de flujo turbulento, diámetros de mayor tamaño llevarían este flujo a régimen laminar.

Una vez determinado lo anterior, se puede proceder a aplicar el cálculo proporcionado por Perry y Green (2008) para determinar el diámetro de los agujeros. Para aplicar la Ecuación (48), se debe conocer primero la velocidad de entrada del flujo al tubo, para esto, se tomará un valor bombeado de 20 L/min (valor central de la capacidad de la bomba), ya que como se dijo anteriormente, el desempeño del rociador es independiente del valor de flujo utilizado. Nótese que el flujo en cada rama es una cuarta parte del valor bombeado.

La velocidad de entrada se puede calcular de la siguiente forma, sabiendo que el flujo en la rama será de 5 L/min y el diámetro interno del tubo es de 0.0124 m

$$v_e = \frac{\dot{V}}{A_t} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D_{in}^2} = \frac{4 \cdot 0.0000833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot (0.0124 \text{ m})^2} = 0.69 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (49)$$

Por otra parte, aplicando la Ecuación (48)

$$\frac{v_o}{v_e} = \frac{A_t}{A_o} = \sqrt{10} \cdot C_o = \sqrt{10} \cdot 0.62 = 1.961$$

Debido a que el área transversal de la tubería es de

$$A_t = \frac{\pi \cdot D_{in}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.0124 \text{ m})^2}{4} = 0.000121 \text{ m}^2 \quad (50)$$

Se puede calcular el área total de los 10 agujeros de la forma

$$A_{T_o} = \frac{0.000121 \text{ m}^2}{1.961} = 0.0000616 \text{ m}^2 \quad (51)$$

Por lo que cada agujero tiene un área de 0.0000616 m^2 , con lo que se obtiene un diámetro de agujero de

$$D_o = \frac{4 \cdot 0.0000616 \text{ m}^2}{\pi} = 0.0028 \text{ m} = 2.8 \text{ mm} \quad (52)$$

Con lo que queda totalmente definido el diseño del rociador. Para su construcción se utilizó una broca de taladro de 2.78 mm (7/64 de pulgada), por ser el valor más cercano al de diseño.



Figura 48. Rociador una vez colocado en la torre de enfriamiento.

6.2.5. Colocar el ducto de ventilación de la torre de tiro inducido fuera del laboratorio

Para colocar este ducto fuera del laboratorio existen dos opciones posibles:

- La primera de ellas consiste en la conexión de este, al ducto del extractor de aire más cercano, sin embargo, el extractor cuenta con garantía y no es posible realizarle ninguna modificación.
- La segunda es sacar el ducto por el techo del laboratorio. Esta opción también presenta el inconveniente de que no es posible realizar ninguna modificación al edificio sin la aprobación del permiso correspondiente. Permisos similares, como en el caso de los solicitados para sacar por el techo los ductos de extracción de las capillas, llevan más de dos años en trámite aproximadamente.

Por estas razones, se considera que dicha mejora se sale de los alcances de este trabajo, por lo que no es posible realizarla como parte de esta Práctica Dirigida. Sin embargo, se recomienda su futura implementación.

6.2.6. Corrección de fugas

Ya que el equipo presentaba el problema de que gran parte del flujo descendente, no caía de vuelta al tanque, sino que lo hacía hacia el piso, se dio solución a este problema por medio de varias tareas. Primeramente, se observó la torre en funcionamiento para averiguar exactamente donde surgía el problema. Se identificó dos razones distintas por las cuales se presentaban fugas.

La primera fue porque la torre tenía errores en su construcción, ya que el extremo inferior de tres de las cuatro paredes de esta, no se encontraba fijado al marco interno del equipo. Es por esto, que la totalidad del flujo de agua que descendía por las paredes del equipo, salía por el espacio entre dicha pared y el marco, lo que provocaba que este líquido cayera directamente al piso. Para dar solución a este problema, se colocó empaques de hule entre la pared y el marco interior, se atornillaron estas piezas entre sí y se colocó silicón para sellar cualquier pequeño espacio entre estos.

La segunda razón por la que se presentaban fugas, fue porque los chorros de agua que bajan de la torre al tanque, cercanos al borde, podían desviarse y caer fuera. Este hecho se agravaba debido a que la base de la torre tiene las mismas dimensiones que el tanque. Para solucionar esto, se confeccionaron paletas deflectoras de hojalata, que desviarán el flujo de los bordes de la salida de la torre hacia el interior del tanque. Estas paletas se diferencian de otras colocadas en el pasado en su forma de sujeción y punto de colocación en la torre; ya que anteriormente estas se han colocado sobre el tanque, permitiendo que el agua tenga libertad en el trayecto entre la torre y estas. Por otra parte, las confeccionadas se colocaron fijadas a la torre, en su parte inferior. Ya que estas se sujetaron desde la parte externa de la pared de la torre, la totalidad del flujo en la cercanía de los bordes es direccionado hacia el tanque. Estas dos acciones fueron suficientes para eliminar las fugas por completo.

6.2.7. Sujeción del sistema de tuberías

Las tuberías de este equipo no tenían ningún tipo de soporte, estas se encontraban sostenidas por su conexión a la bomba y por gravedad, sobre el marco de la bomba. Este problema se agravó al colocar el nuevo sensor y válvula reguladora de flujo, ya que se notó que al aplicar fuerza para la manipulación de dicha válvula, la tubería se movía y tenía como punto de pivote el rotámetro, el cual es de plástico. Para evitar dañar el rotámetro, así como para sujetar adecuadamente la tubería, se colocaron soportes de riel y gasa tipo Strut, con lo cual se eliminó por completo el movimiento de dicha tubería.

6.2.8. Tareas de mantenimiento

Se retiró, lijó y barnizó la totalidad de las rejillas de la torre, así como la estructura interna que no es posible retirar. Adicionalmente, se retiró las puertas y paredes del equipo, con el fin de lavar el acrílico y retirar suciedad e incrustaciones de dureza, así como para pintar el marco metálico del equipo. Se colocó nuevo sellador entre las paredes del equipo para evitar fugas de agua.

6.3. Tanque agitado con aireación

6.3.1. Tanque

Se propuso la sustitución del tanque, ya que el anterior se encontraba muy deteriorado. Se decidió no cambiar el diseño y dimensiones anteriores, ya que por medio de investigación en diversas fuentes, no se encontró un criterio técnico para justificar el cambio. Al contrario, dicho diseño se encuentra en concordancia con la recomendación de Treybal (1980) para tanques de burbujeo, de utilizar alturas del tanque mayores a su diámetro con el fin de aumentar el tiempo de residencia del gas y con esto la transferencia de masa. Sin embargo, se decidió añadirle mamparas por las razones ya expuestas, además de modificar la forma de conexión con la tubería de aire.

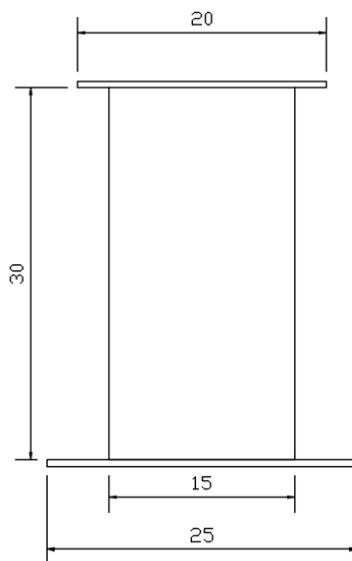


Figura 49. Vista lateral del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia).

El cuerpo de este, consiste en tubo acrílico de 0.15 m de diámetro y 0.003 m de espesor, y como fondo tiene adherida una lámina cuadrada de acrílico de 0.25 m de lado. Su tapa, mostrada en la Figura 50, se fija al tanque mediante tornillos y está compuesta por una pieza circular de acrílico de 0.20 m de diámetro, con orificios para la introducción del eje del motor (agujero central), la tubería de aire (agujero de 0.0135 m) y el sensor de oxígeno disuelto (agujero de 0.025 m). En dicha figura se muestra la posición del tanque como una

línea punteada. La introducción de tuberías se da por medio de un niple sujeto a la tapa por presión, mediante dos uniones de tubería en sus extremos. En la unión inferior se conecta la tubería que llevará hasta el burbujeador, mientras que en la unión superior un acople rápido para manguera, que se conectará al sistema principal de tuberías.

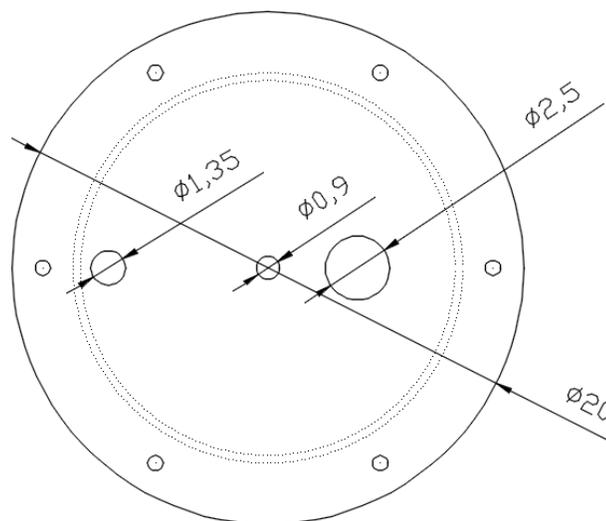


Figura 50. Detalle de la tapa del tanque (Medidas en centímetros, elaboración propia).

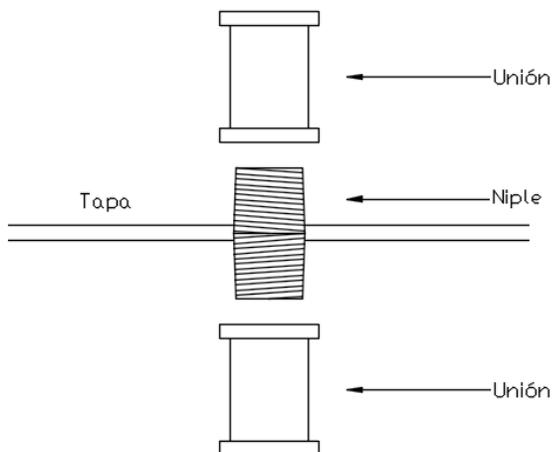


Figura 51. Vista lateral de la introducción de la tubería de aire al tanque y su sujeción a la tapa (Elaboración propia).

6.3.2. Mamparas

Las dimensiones de estas se basaron en las aportadas por McCabe et al. (2007). Corresponden a cuatro piezas de 0.30 m de largo (altura del tanque), mientras que el ancho es de una doceava parte del diámetro del tanque, es decir, 0.0125 m. Se encuentran adheridas al interior del tanque, separadas cada 90°.

6.3.3. Difusor de gas

Como se propuso, se adquirió un difusor de acero inoxidable sinterizado, con diámetros de orificio de 2 micrómetros, con el fin de producir burbujas de tamaño reducido para aumentar el área de transferencia y con esto lograr un ahorro de nitrógeno. Sin embargo, se consideró importante también contar con un burbujeador en forma de anillo como el utilizado anteriormente para que el estudiante pueda observar y estudiar las diferencias en el desempeño de estos. Ya que el burbujeador anterior es incompatible con el nuevo diseño de tuberías y conexiones del módulo de tanque agitado con aireación, se procedió al diseño y construcción de uno nuevo.

Se decidió construir un burbujeador en forma de aro de 0.05 m de diámetro, correspondiente al diámetro del agitador, tal como lo recomienda Treybal (1980) para tanques de burbujeo agitados mecánicamente. Además, como material se decidió utilizar tubo de cobre flexible por varias razones:

- Es un material fácil de doblar en forma de aro ya que este no se quiebra o agrieta, en comparación con otros materiales, tales como hierro, PVC o tubo de cobre rígido.
- Es fácil de soldar entre sí, además, fácil de soldar a un acople de latón con rosca de 0.0137 m (1/4 de pulgada NPT), lo que permitiría su colocación sencilla en el tanque.
- Sufre deterioro mínimo al estar sumergido en agua.

El diámetro de tubo elegido originalmente fue de 0.0127 m (1/2 de pulgada nominal para cobre) con el fin de mantener un diámetro similar al de la tubería de alimentación de 0.0137 m (1/4 de pulgada nominal para hierro). Sin embargo, durante el proceso

constructivo se observó que utilizar este diámetro de tubo resulta inviable, ya que no se puede doblar en un aro de 0.05 m de diámetro. Al intentarlo, dicho tubo se deformó completamente quedando estrangulado y con forma de cinturón muy delgado, dejando una muy pequeña franja para el paso del gas.

Por esta razón, se decidió utilizar tubo del diámetro inmediato inferior, es decir, de 0.0095 m (3/8 de pulgada nominal), con el cual sí fue posible la construcción de un aro de las dimensiones deseadas. Este diámetro de tubo corresponde al del burbujeador anterior.

Para el diseño del diámetro de agujeros y cantidad de estos, se utilizó la Ecuación (53), presentada por Kulkarni, Roy y Joshi (2007), basada en los artículos de Knaebel (1981) y Senecal (1957), con la que se determina el diámetro de los orificios para un 5 % de distribución desigual, o lo que es lo mismo, un 95 % de distribución uniforme. Dicha ecuación se muestra a continuación.

$$D_o \leq \frac{0.7 \cdot D_{in}}{(0.27 + n^2)^{0.25}} \quad (53)$$

Donde

D_o : Diámetro de agujeros, mm

D_{in} : Diámetro interno de tubería, mm

n : Cantidad de agujeros, adim

Cabe destacar que la Ecuación (53) está desarrollada para burbujeadores de tubo recto, sin embargo, como afirman Kulkarni et al. (2007), prácticamente no hay información disponible para burbujeadores de tipo anillo.

El tamaño de orificio quedó definido por el criterio técnico de que el menor diámetro de broca que fue posible conseguir fue el de 1.59 mm (1/16 de pulgada), por lo que despejando el número de agujeros de la Ecuación (53) resulta

$$n \leq \sqrt{\left(\frac{0.7 \cdot D_{in}}{D_o}\right)^4 - 0.27} \quad (54)$$

Sustituyendo valores

$$n \leq \sqrt{\left(\frac{0.7 \cdot 7 \text{ mm}}{1.59 \text{ mm}}\right)^4 - 0.27}$$

$$n \leq 9.5$$

Su forma de construcción consistió en hacer girar dicho tubo alrededor de un trozo de tubería de hierro de 0.048 m de diámetro (1.5 pulgadas de diámetro nominal) para obtener un aro, por lo que las dimensiones reales de este anillo resultaron de 4.9 cm de diámetro interno y 0.063 m de diámetro externo y 0.007 m de grosor. Los agujeros se ubican en un círculo imaginario de 0.0555 m de diámetro. Tiene soldado un acople de latón, el cual se enrosca en un codo, ubicado en el extremo de la tubería de entrada del aire.

Inicialmente se le realizaron 9 perforaciones uniformemente distribuidas, sin embargo, se observó en su operación que había agujeros por los que no había salida de gas a flujos de operación bajos. Por esta razón, estas se eliminaron y se realizaron 8 nuevas perforaciones uniformemente distribuidas, lo que resultó en un desempeño satisfactorio.

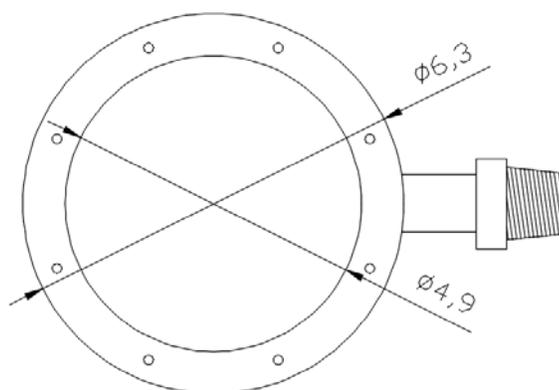


Figura 52. Diagrama del burbujeador en forma de anillo (Medidas en centímetros, elaboración propia).

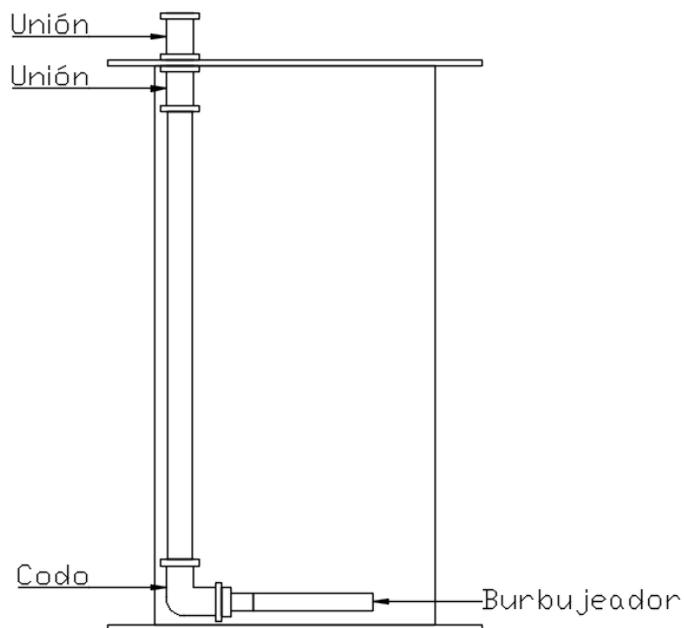


Figura 53. Diagrama de la introducción de la tubería de aire al tanque y colocación del burbujeador (Elaboración propia).

6.3.4. Automatización de la toma de datos

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el sensor de oxígeno disuelto destinado normalmente para el experimento, así como una placa computadora Raspberry Pi 3. Se prefirió esta placa sobre otras tales como Arduino, por su memoria y capacidad de almacenamiento de datos, ya que fácilmente se puede conectar un dispositivo USB con el fin de extraer los datos medidos. Por otra parte, debido a que el sensor del laboratorio brinda una señal analógica, para ser utilizado con la Raspberry Pi, esta debe ser convertida a señal digital, mediante un conversor analógico-digital ADS1115.

6.3.5. Cambiar el sistema de tuberías

Para la selección del diámetro de tubería, se usó el criterio comúnmente utilizado en el diseño de redes de aire comprimido, es decir, se eligió el diámetro de tubería más pequeño que produzca una caída de presión aceptable. Para esto, la velocidad del flujo de aire no puede sobrepasar los 20 m/s.

Se escogió la tubería de 0.0137 m de diámetro externo (1/4 de pulgada nominal cédula 40), por lo que se hará la comprobación del flujo máximo recomendado. Se sabe que el flujo volumétrico está dado por la multiplicación de la velocidad del flujo, por el área transversal de tubería, y sabiendo que el área de una tubería de 0.0092 m de diámetro interno es de 0.0000665 m², se obtiene

$$\dot{V} = v \cdot A = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.0000665 \text{ m}^2 = 0.00133 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (55)$$

$$\dot{V} = 79.8 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Debido a que en el laboratorio no se trabaja con flujos de más de 30 L/min de aire (capacidad máxima del rotámetro utilizado), se considera que dicha tubería es apropiada para la tarea requerida. Si bien es cierto que aún se podría utilizar tubería de menor diámetro, se decide utilizar la de 0.0137 m de diámetro, por otras razones distintas al criterio ya mencionado, por ejemplo:

- La tubería más pequeña disponible fácilmente en el mercado nacional es la de 0.0137 m de diámetro (1/4 de pulgada); tuberías de menor diámetro, como la de 0.0103 m (1/8 de pulgada) es de difícil disponibilidad.
- Al igual que la tubería, los accesorios de menor diámetro son de difícil disponibilidad, especialmente llaves de paso.

Su configuración es muy similar a la anterior, con la excepción de que se añadió una sección de tubería para colocar una manguera libre con la cual realizar la oxigenación de un beaker con agua para la determinación de la constante de rezago del sensor. Para esto anteriormente se conectaba una manguera a la línea de aire comprimido del laboratorio, independiente del módulo y centro de la práctica. Con el cambio se logra mayor unidad, permitiendo a todos los estudiantes enfocarse en dicha tarea.

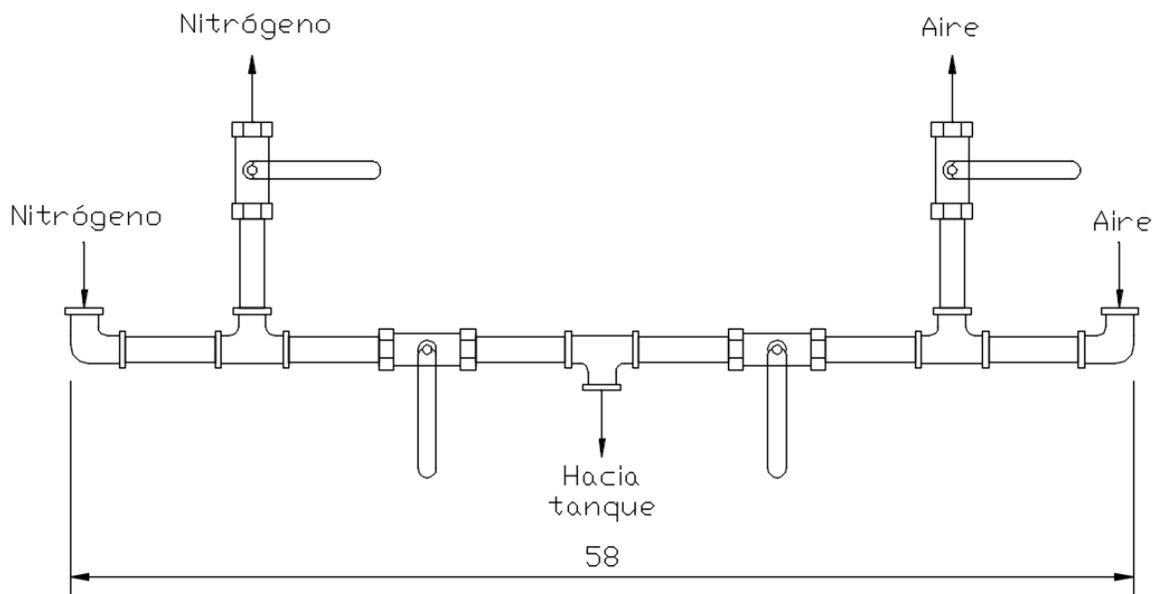


Figura 54. Diagrama de tuberías del módulo de tanque agitado (Medidas en centímetros, elaboración propia).

6.3.6. Cambiar la turbina de agitación

Como se había propuesto anteriormente, se recomendó utilizar un agitador que tuviera paletas planas, tal como uno de disco, es decir, uno que impartiera movimiento radial y tangencial al líquido, minimizando el movimiento vertical, con el fin de aumentar el tiempo de residencia de las burbujas en el tanque. Además, se había propuesto que este agitador tuviera dimensiones estándar respecto al tanque, con el fin de facilitar el escalamiento en el caso requerido.

Por esta razón, se utiliza para su diseño las dimensiones proporcionadas por McCabe et al. (2007) para un agitador estándar. Como es ya sabido, el diámetro total de este debe ser una tercera parte del diámetro del tanque, y ya que este es de 0.1524 m (6 pulgadas), el diámetro del agitador deberá ser de 0.051 m. Por otra parte, la altura de cada paleta deberá ser una quinta parte del diámetro del agitador, es decir, 0.01 m; mientras que el ancho de estas de una cuarta parte el diámetro del agitador, o 0.013 m. En su centro posee un agujero

de 0.01 m de diámetro, correspondiente al tamaño del eje del motor presente en el laboratorio. Su diagrama se muestra a continuación:

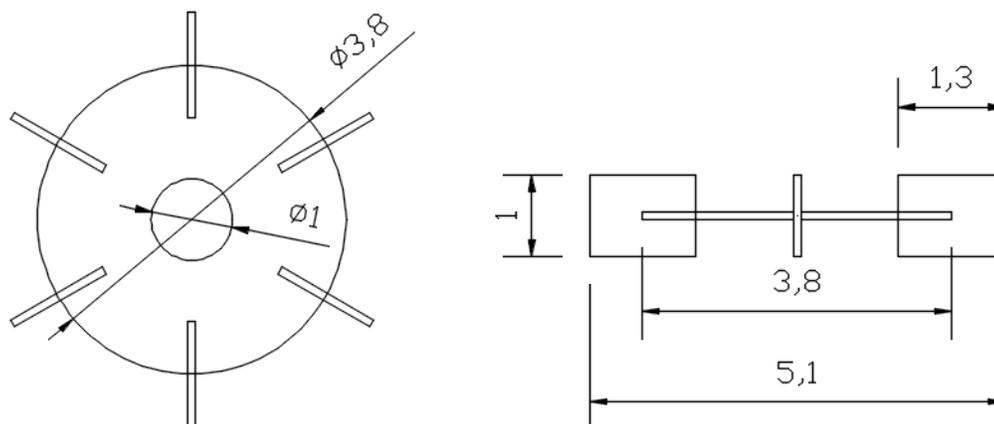


Figura 55. Diseño del agitador de disco (Medidas en centímetros, elaboración propia).

En el laboratorio existe gran variedad de distintos agitadores. Por medio de una búsqueda se determinó que existen dos que poseen exactamente las medidas anteriormente mostradas, por lo que se utilizará uno de dichos dispositivos.

6.3.7. Tareas de mantenimiento

Se cambió la superficie de trabajo anterior, la cual era metálica y se encontraba altamente oxidada, por una de madera barnizada. Además, se cambió el panel de acrílico anterior, el cual se encontraba quebrado y flojo, por un panel de madera. En este se colocó el rotámetro de aire, así como la pantalla del sensor de oxígeno disuelto.

Capítulo 7

Puesta en marcha de los equipos

7.1. Torre de pared húmeda

Con el objetivo de evaluar el equipo luego de haber llevado a cabo las mejoras, así como de elaborar los manuales de equipo y práctica de laboratorio propuestos, se llevó a cabo el experimento para determinar el coeficiente de transferencia de masa en una torre de pared húmeda. Para esto, se realizaron varias corridas variando el flujo de aire introducido a la columna, midiendo la temperatura y humedad relativa del aire de entrada y salida, así como la presión atmosférica y la temperatura del agua de entrada y salida. Las mediciones se realizaron en el estado estacionario, luego de variar el flujo de aire. El alcance de este estado se verificó mediante la visualización en pantalla de la estabilización de las variables antes mencionadas.

Para iniciar con el experimento, se preparó el equipo para su arranque y operación de acuerdo con su manual, presentado en el Apéndice E.1. Hecho esto, se realizó una primera corrida preliminar para observar que no existiera ningún problema de operación evidente, por ejemplo, una fuga; sin embargo, este no fue el caso. Adicionalmente, se verificó que los sensores y el programa de adquisición de datos funcionaran adecuadamente.

Una vez terminada la revisión, se procedió a la realización del experimento como tal, de acuerdo con el procedimiento de la práctica de laboratorio “Determinación del coeficiente de transferencia de masa en una torre de pared húmeda”, presentado en el Apéndice D.1. Se realizaron cinco corridas, variando el flujo de aire para cada una; estos valores numéricos medidos, se muestran en el Apéndice A.1. Con estos, y de acuerdo a la metodología de cálculo presentada en el Apéndice C.1., se calculan los coeficientes de transferencia de masa, los cuales se presentan a continuación, en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Coeficientes de transferencia de masa calculados para la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Número de Reynolds del aire	Coeficiente de transferencia de masa
\dot{V}_a (L/min)	Re_a (adim)	K_y (mol/m ² s)
15	662	0.141
20	883	0.173
25	1104	0.211
30	1325	0.255
35	1545	0.288
40	1766	0.333
45	1987	0.363
50	2208	0.377
55	2428	0.424
60	2649	0.438
65	2870	0.478
70	3091	0.517
75	3311	0.531
80	3532	0.562
85	3753	0.598
90	3974	0.613
95	4194	0.650
100	4415	0.665

Se observa el comportamiento esperado, ya que como se comentó anteriormente, para un fenómeno en el que la resistencia a la transferencia de masa se encuentra en la fase gaseosa, dicha transferencia de masa se ve influenciada principalmente por la turbulencia en esta fase, y por ende, el coeficiente de transferencia de masa aumenta conforme lo hace el flujo de aire. Adicionalmente, el flujo de agua se mantuvo constante durante todo el experimento, a un valor de 1 L/min. El efecto del flujo de aire sobre el coeficiente de transferencia de masa, se visualiza también en la Figura 56.

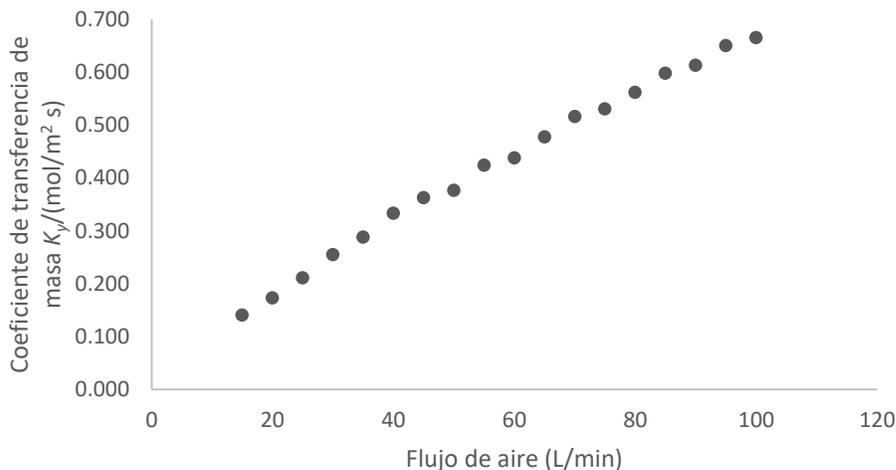


Figura 56. Variación del coeficiente de transferencia de masa respecto al flujo de aire.

Se determinó también la correlación de Sherwood (Kafesjian et. al., 1961) para el coeficiente de transferencia de masa, basada en los números adimensionales propios del experimento, de acuerdo a la metodología de cálculo presentada en el manual de práctica (Apéndice D.1). Esta correlación tiene la forma de la Ecuación (56).

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^c \cdot \left(\frac{4\Gamma}{\mu}\right)^d \quad (56)$$

Como se puede observar, dicha correlación presenta el ajuste por ondulaciones en la película. Esto debido a que en el experimento, la película descendente no fue completamente lisa. Al ajustar dicha correlación a los datos obtenidos, por medio de una regresión no lineal, utilizando el programa *Polymath*, se obtienen los parámetros presentados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros para la correlación del coeficiente de transferencia de masa.

a	b	c	d
0.632	0.809	0.582	-0.040

En la Figura 57 se muestran los valores medidos del coeficiente de transferencia de masa, respecto de los obtenidos por medio de la correlación, o línea de 45°. De esta figura, y del coeficiente de correlación calculado por *Polymath* ($R^2=0.9980$), se comprueba una alta correlación entre los valores medidos y los obtenidos por medio del modelo.

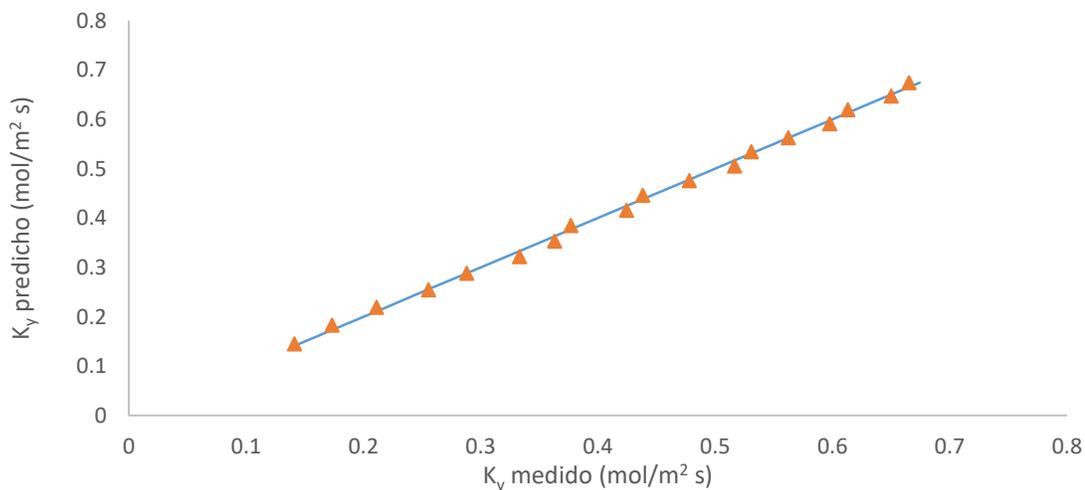


Figura 57. Coeficiente de transferencia de masa predicho respecto al medido.

Por otra parte, de la Figura 58 se observa que los residuos para dicha correlación son aleatorios, y de la Figura 59 se evidencia que los residuos no tienen ninguna dependencia con el orden en que se tomaron los datos, por lo cual se considera que el modelo no solo tiene una alta correlación, sino que también se ajusta bien a los datos.

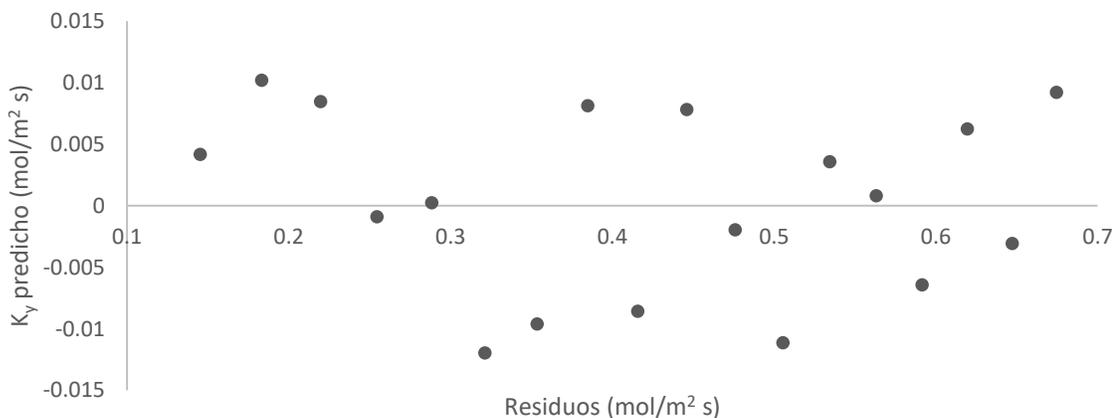


Figura 58. Coeficiente de transferencia de masa predichos respecto a los residuos.

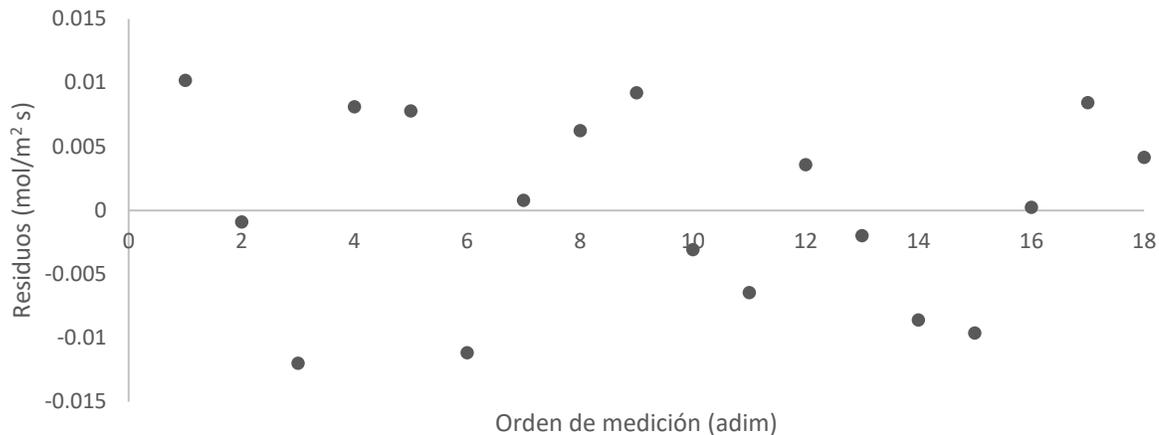


Figura 59. Dependencia de los residuos respecto al orden de medición.

Por todo lo anterior, se comprueba que las mejoras llevadas a cabo trabajan bajo las condiciones planteadas, y que el equipo en general opera de manera satisfactoria. Además, se comprueba que es posible operar el equipo en cuestión y llevar a cabo una práctica de laboratorio de determinación del coeficiente de transferencia de masa en una torre de pared húmeda, utilizando como guía el manual de equipo y de práctica de laboratorio aportados por este trabajo.



Figura 60. Rebalse de agua en la entrada a la columna.



Figura 61. Sección superior del módulo de torre de pared húmeda.

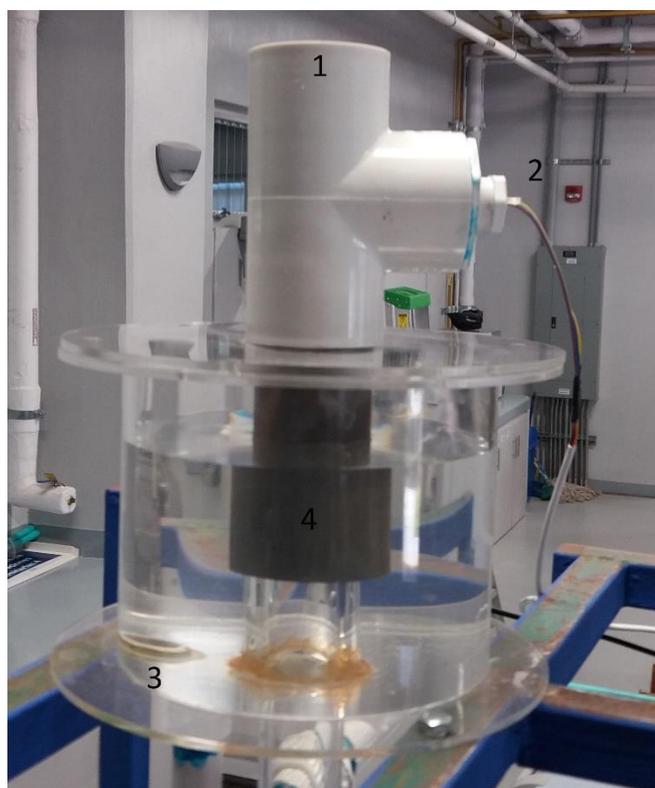


Figura 62. Depósito superior del módulo de torre de pared húmeda.

Donde 1 representa la salida de aire, 2 la entrada del sensor de temperatura y humedad relativa del aire de salida, 3 la entrada de agua al depósito y 4 la pieza de estabilización del agua de entrada a la columna.

7.2. Tanque agitado con aireación

Con el objetivo de evaluar el equipo luego de haber llevado a cabo las mejoras, así como de realizar los manuales de equipo y práctica de laboratorio propuestos, se llevó a cabo el experimento para determinar el coeficiente de transferencia de masa en un tanque agitado con aireación. Para eso, realizaron varias corridas variando el flujo de aire alimentado, así como la velocidad de agitación, midiendo la concentración de oxígeno en el tanque respecto al tiempo.

Se preparó el equipo para su arranque y operación, siguiendo las instrucciones de preparación del tanque, conexiones eléctricas y del aire comprimido y nitrógeno, de acuerdo al procedimiento presentado en el Apéndice E.2, correspondiente al manual de equipo de torre de pared húmeda. Se decidió utilizar el burbujeador de anillo para comprobar que se cumplía la condición planteada de distribución uniforme; además, se realizó una calibración del sensor de oxígeno disuelto y se hizo una comprobación inicial de que la Raspberry funcionara adecuadamente, esto por medio de la observación de que los datos presentados en la pantalla del sensor coincidieran con los que la Raspberry registró.

Entonces, se realizó un experimento, siguiendo en todo momento el procedimiento del manual de práctica “Determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en un tanque agitado con aireación”, presentado en el Apéndice D.2. La primera parte del experimento consistió en la determinación de la constante de rezago del sensor, en la que se obtuvo los datos presentados en el Apéndice C.2., y de ellos, la Figura 63, presentada a continuación, la cual corresponde a la primera de tres corridas para la determinación de esta constante.

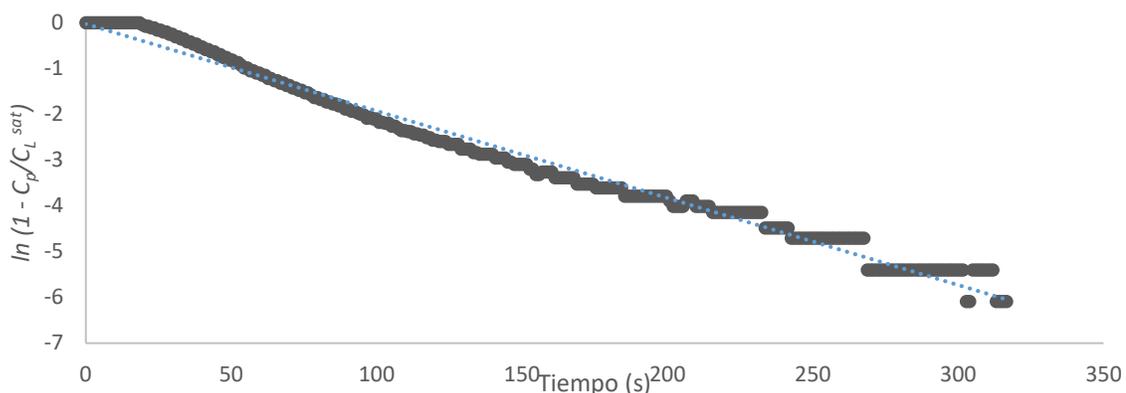


Figura 63. Determinación de la constante de rezago del sensor de oxígeno disuelto.

La Figura 63 presenta la Ecuación (57) como mejor ajuste

$$\ln\left(1 - \frac{C_p}{C_L^{sat}}\right) = -0.019 \cdot t - 0.023 \quad (57)$$

$$R^2 = 0.9852$$

Ya que la constante de rezago k_p corresponde al valor de la pendiente de la recta, multiplicado por -1, esta tiene un valor de 0.019 s^{-1} . Para la determinación de esta, se utilizó el procedimiento de cálculo presentado en el Apéndice D.2.

Luego, se llevó a cabo la segunda parte del experimento, que consistió en realizar corridas variando el flujo de aire alimentado, así como la velocidad de agitación. Los resultados numéricos de estas corridas, así como las gráficas obtenidas se muestran en el Apéndice A.2. Con dichos datos, se calculó el coeficiente de transferencia de masa corregido, para cada corrida, resultados que se presentan en el Cuadro 8.

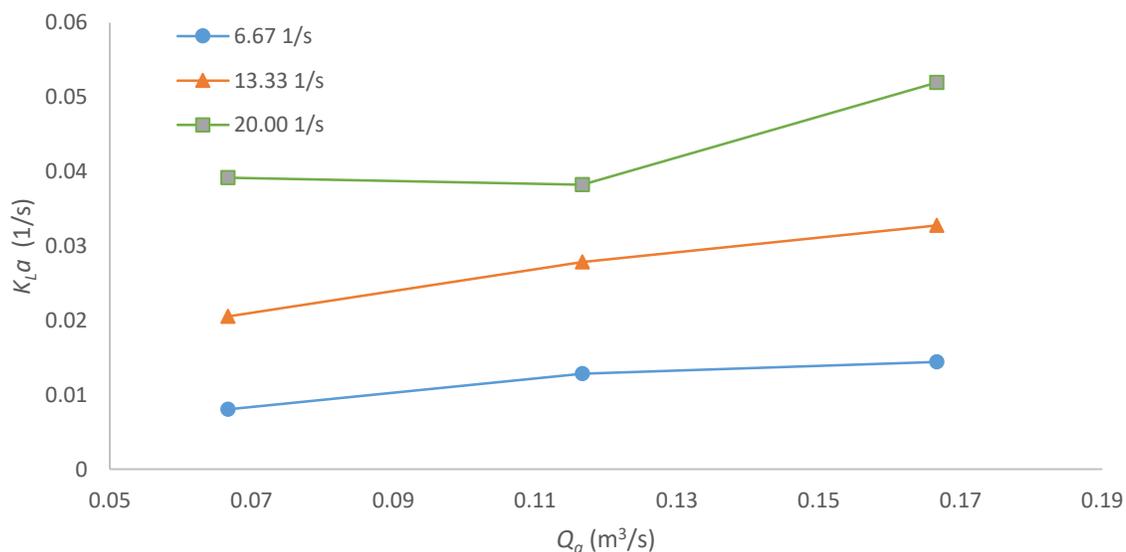
Cuadro 8. Coeficientes de transferencia de masa calculados para cada corrida.

Velocidad de agitación	Flujo de aire	Coefficiente volumétrico de transferencia de masa
N (1/s)	\dot{V}_a (m ³ /s)	$K_L a$ (1/s)
6.67	0.067	0.0080
6.67	0.117	0.0128

Cuadro 8 Continuación. Coeficientes de transferencia de masa calculados para cada corrida.

Velocidad de agitación	Flujo de aire	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
N (1/s)	\dot{V}_a (m ³ /s)	$K_L a$ (1/s)
6.67	0.167	0.0144
13.33	0.067	0.0205
13.33	0.117	0.0278
13.33	0.167	0.0327
20.00	0.067	0.0392
20.00	0.117	0.0382
20.00	0.167	0.0519

En la Figura 64, se presenta la variación del coeficiente de transferencia de masa con respecto a la variación de flujo de aire, para distintas velocidades de agitación. De esta figura, se puede notar que la velocidad de agitación tiene un mayor efecto sobre la transferencia de masa que el flujo de aire utilizado.

**Figura 64.** Variación del coeficiente de transferencia de masa respecto al flujo de aire alimentado.

Esto debido a que la agitación no solo rompe las burbujas grandes, convirtiéndolas en más pequeñas y con esto aumenta el área de transferencia; sino también porque aumenta el mezclado de dichas burbujas en todo el volumen del tanque. Un gran flujo de aire por sí mismo no es capaz de aumentar la transferencia en gran medida, comparado con la velocidad de agitación; debido a que las burbujas tienden a la coalescencia y con esto la reducción de su área. Además, el flujo de aire se escapa hacia arriba fácilmente.

Con estos resultados, se realizó la correlación para el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, la cual se presenta a continuación en la Ecuación (58).

$$K_L a = \alpha \cdot \dot{V}_a^\beta \cdot N^\gamma \quad (58)$$

Por medio del método de los mínimos cuadrados, se obtuvo los parámetros que ajustan dicho modelo a los datos experimentales, los cuales se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros de ajuste para la correlación del coeficiente de transferencia de masa en el tanque agitado.

α (adim)	β (adim)	γ (adim)
0.0031	0.385	1.155

Lo que se evidencia gráficamente de la Figura 64, se corrobora numéricamente por medio de los parámetros de la correlación, lo cual es que la velocidad de agitación tiene un efecto mayor que el flujo de aire, sobre el coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Al graficar los valores del coeficiente medido, respecto al calculado por dicho modelo, se obtiene la Figura 65, en la cual se compara también contra la correlación, o línea de 45°. Por otra parte, al graficar los residuos del coeficiente de transferencia medido, respecto del calculado, se obtiene la Figura 66. En esta, se denota que no existe una tendencia evidente de los residuos, y estos se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, por lo que no sólo existe una alta correlación de los datos con el modelo, sino que también el modelo describe los datos de manera adecuada.

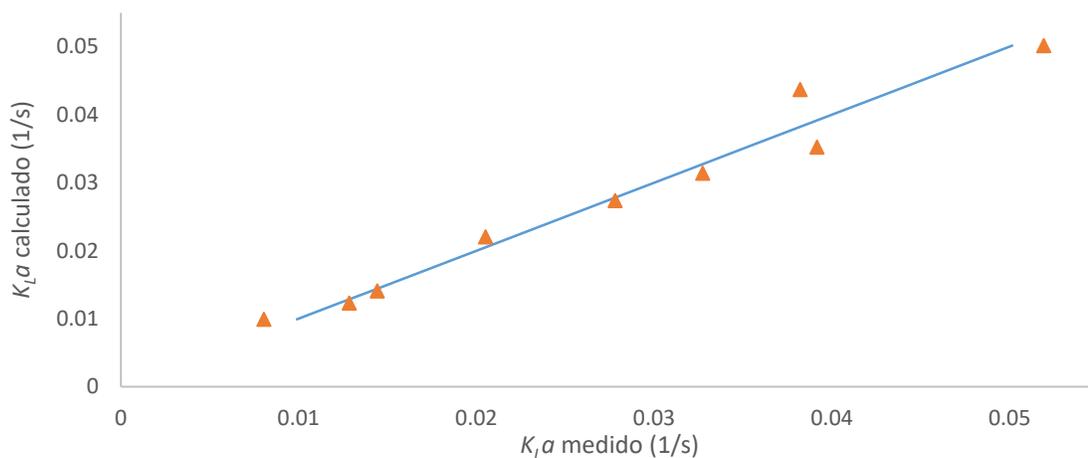


Figura 65. Coeficientes de transferencia de masa medidos, respecto al modelo, para el tanque agitado.

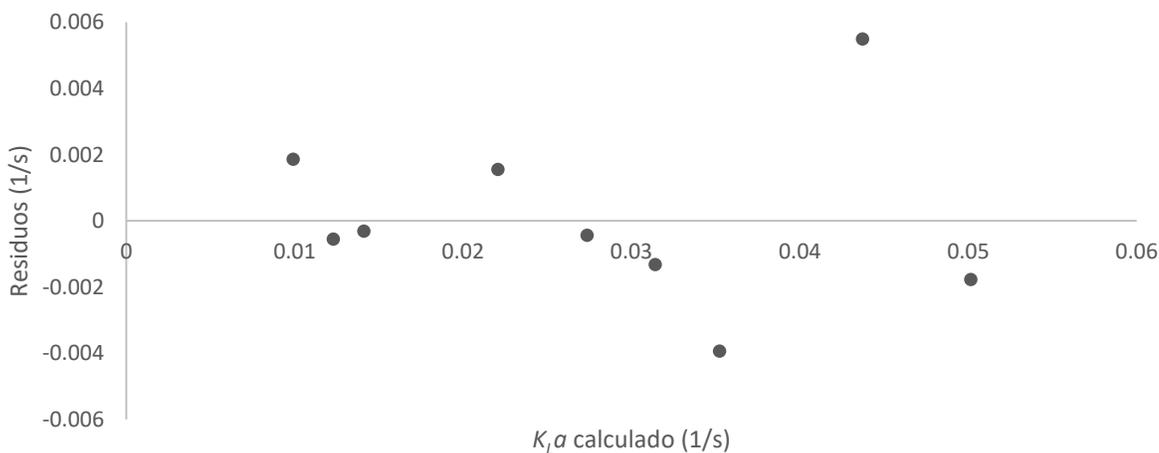


Figura 66. Residuos de la correlación para el experimento de tanque agitado.

En este experimento se observó un funcionamiento adecuado de la Raspberry Pi, ya que en todo momento, los valores medidos y presentados en la pantalla del sensor, coincidieron con los registrados. En cuanto al burbujeador, se observó un flujo similar por cada orificio de este, obteniendo una distribución uniforme y con esto cumpliendo con el criterio de diseño de dicho dispositivo. Las mamparas del tanque fueron eficaces en evitar la formación de un vórtice para todo el rango de velocidad de agitación del experimento, y no se observó ningún inconveniente con la operación de las demás partes del equipo.

De lo anterior, se comprueba que el equipo trabaja a las condiciones planteadas, y que es posible operar satisfactoriamente el equipo utilizando el procedimiento aportado. Además, es posible llevar a cabo una práctica de laboratorio de determinación del coeficiente de transferencia de masa en un tanque agitado con aireación, utilizando tanto el equipo en cuestión, como el manual de equipo y procedimiento de práctica, aportados por el presente trabajo.



Figura 67. Burbujeo uniforme en cada agujero.



Figura 68. Ausencia de vórtice a una velocidad de agitación de 1200 revoluciones por minuto.

7.3. Torre de enfriamiento

Con el fin de determinar el coeficiente de transferencia de masa en una torre de enfriamiento, así como una correlación que lo describa respecto al flujo de agua alimentado, se llevó a cabo el experimento descrito en la práctica “Torres de enfriamiento”, presentada en el Apéndice D.3. Para iniciar, se llevó a cabo la preparación del equipo de acuerdo a su manual, reportado en el Apéndice E.3.

El experimento como tal inició con el calentamiento del agua, la cual se llevó hasta una temperatura de 50 °C, medida mediante la pantalla de la caja de control del sistema de calentamiento. Se fijó una velocidad del ventilador a un valor de 5 de su reóstato, correspondiente a su valor central. Se procedió entonces con el arranque de la bomba y la regulación del flujo para la primera de cuatro corridas, donde se midió la temperatura del agua de entrada y salida, así como la humedad relativa y temperatura del aire de entrada y salida. Cabe mencionar que para poder realizar todas las corridas a una temperatura del agua de entrada constante, fue necesaria una pausa al finalizar cada corrida para lograr este calentamiento, aunque esta pausa no fue de más de cinco minutos. Estos datos se presentan en el Cuadro 15 Apéndice A.3.

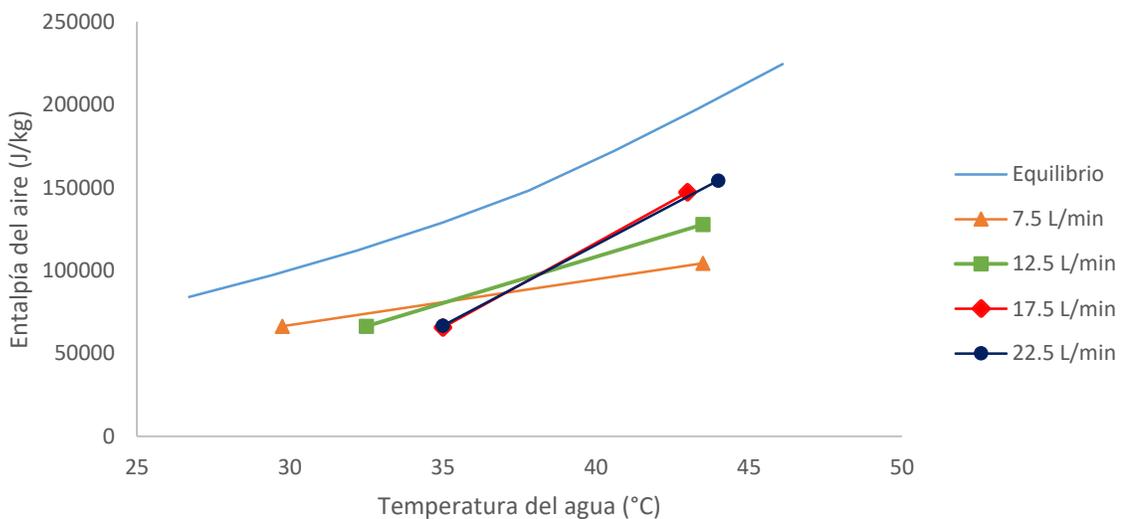


Figura 69. Curvas de operación para cada corrida a distintos flujos de agua, y un flujo de aire de 0.105 kg/s.

El comportamiento de las curvas de operación es el esperado para dicha torre, ya que al aumentar el flujo de agua, la temperatura del agua de salida aumenta, y las gráficas se desplazan cada vez más hacia la derecha. Lo anterior debido a que a mayor flujo de agua y para un mismo flujo de aire, la capacidad de la torre de enfriar dicho flujo disminuye, por lo que el agua abandona la torre cada vez más caliente. Asimismo, la entalpía del aire de salida aumenta al aumentar el flujo de agua, debido a que la energía transferida al aire es cada vez mayor.

El coeficiente de transferencia de masa se determinó por medio del método de las unidades de transferencia. Para esto, se llevó a cabo una integración gráfica por el método de los trapecios, utilizando la Ecuación (28) para calcular el coeficiente de transferencia. Con esto, se obtiene el

Cuadro 10 , en el que se presentan dichos coeficientes, así como el número de unidades de transferencia.

Cuadro 10. Resultados del experimento de torre de enfriamiento.

Flujo de agua	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa	Unidades de transferencia
\dot{V}_a (L/min)	K_{ya} (kg/m ³ s)	N_{toG} (adim)
7.5	0.342	0.73
12.5	0.496	1.12
17.5	0.658	1.55
22.5	0.704	1.65

Adicionalmente, y como objetivo del experimento, se determinó una correlación que describiera el coeficiente de transferencia de masa respecto al flujo de agua. Para esto, se utilizó la correlación de Kelly y Swenson (1956), la cual se aplica para torres de enfriamiento de tipo salpicadura con rejillas. Esta correlación es la que se utiliza comúnmente en el curso de laboratorio y tiene la forma de la Ecuación (59).

$$K_y a = \frac{L'}{Z} \left(0.07 + B \cdot n_R \cdot \left(\frac{G'}{L'} \right)^p \right) \quad (59)$$

Donde

$K_y a$: Coeficiente volumétrico de transferencia de masa,

L' : Flujo másico de agua por unidad de área, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$

G' : Flujo másico de aire por unidad de área, $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$

Z : Altura de la torre, m

n_R : Cantidad de rejillas de la torre, adim

B : Parámetro de la correlación, adim

p : Parámetro de la correlación, adim

Ajustando los datos a dicha correlación, se obtienen los parámetros presentados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros de ajuste para la correlación de Kelly y Swenson.

B	p
46.4	0.276

La gráfica de predichos contra observados, así como la de residuos, se presentan en la Figura 70 y la Figura 71 respectivamente.

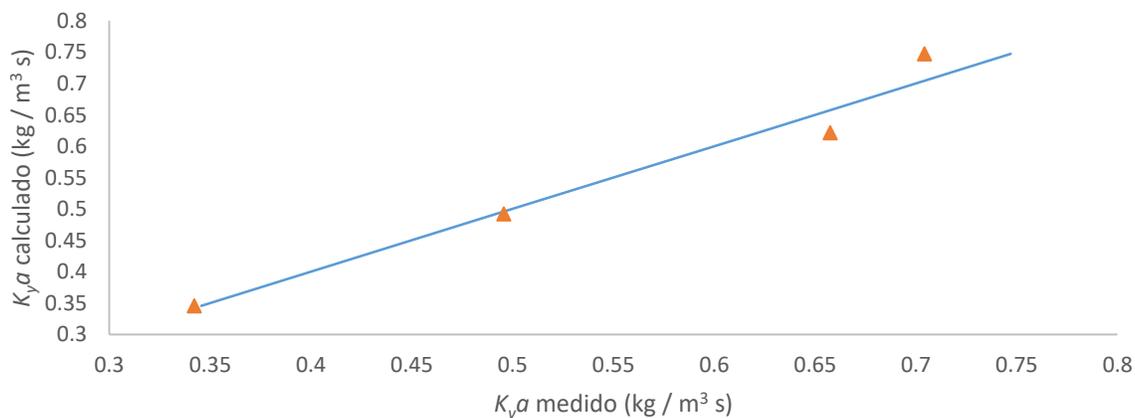


Figura 70. Datos medidos contra los predichos por el modelo de Kelly y Swenson.

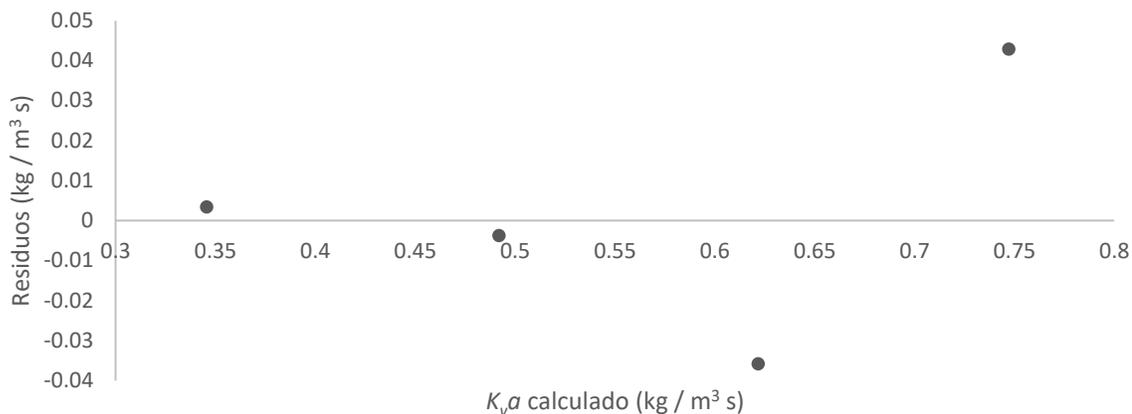


Figura 71. Residuos de la correlación de Kelly y Swenson.

Sin embargo, en la gráfica de residuos se observa un aparente comportamiento en forma de abanico creciente, lo que sugiere que la ecuación modela bien los datos a flujo de agua bajo, pero no así al aumentar el flujo. Por esta razón, se decidió utilizar otra correlación para modelar los datos. Kloopers y Kroger (2005), encontraron que el coeficiente de transferencia de masa en una torre de enfriamiento, no solo depende de los flujos de aire y agua utilizados, sino también de la altura de transferencia, así como de la temperatura de entrada del agua. Su modelo también aplica para torres de tipo salpicadura de rejilla, y tiene la forma de la Ecuación (60).

$$K_y a = c_1 \cdot L'^{c_2} \cdot G'^{c_3} \cdot Z^{c_4} \cdot T^{c_5} \quad (60)$$

Ajustando el modelo a los datos medidos, se obtienen los parámetros adimensionales de ajuste mostrados en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros adimensionales de ajuste del modelo de Kloopers y Kroger.

c1	c2	c3	c4	c5
1.63	0.49	-2.44	8.14	-1.55

De la Figura 72 se observa que este modelo tiene una alta correlación con los datos, además, de la Figura 73 queda en evidencia que no existe un patrón aparente en los residuos, y estos

se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, por lo que los datos se ajustan a esta correlación.

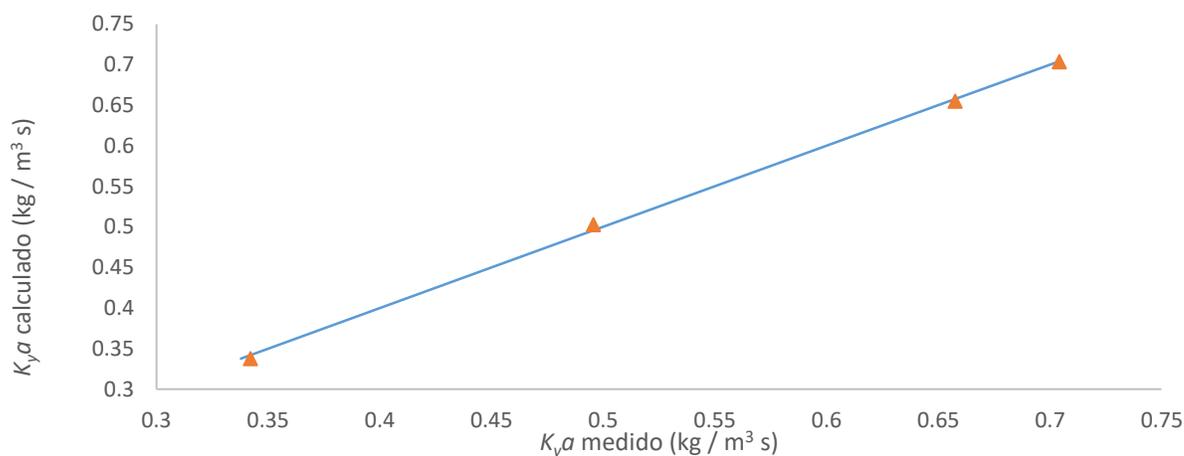


Figura 72. Datos medidos contra los predichos por el modelo de Kloopers y Kroger.

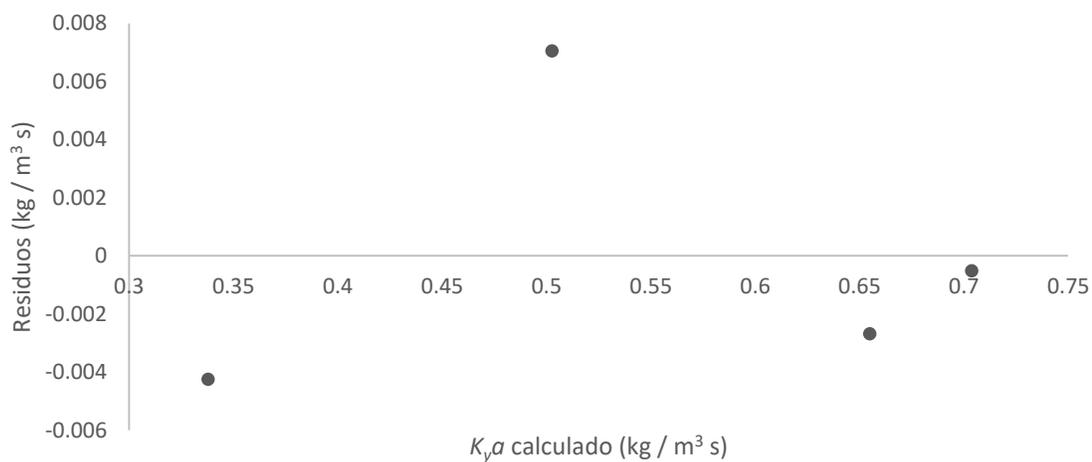


Figura 73. Residuos respecto a los datos predichos por el modelo de Kloopers y Kroger.

De la operación del equipo, se observa que la escala del rotámetro colocado cubre la totalidad del flujo de trabajo de la bomba. Además, al utilizar un rotámetro calibrado, se elimina la necesidad de calibrar el flujo y se evita incurrir en errores de factor humano en el proceso. Por otra parte, se observa que el rociador de agua presenta un flujo similar por cada uno de sus agujeros, cumpliendo así con su criterio de diseño, con lo que se logra una

distribución uniforme del agua. Por último, las paletas anti derrame colocadas para eliminar las fugas de agua en este equipo demostraron ser muy efectivas en su funcionamiento, ya que se eliminó el gran flujo de agua que caía de la torre al piso; este se redirigió efectivamente al tanque.

Por lo anterior, queda en evidencia que el equipo trabaja a las condiciones esperadas, y que no presenta inconvenientes en el funcionamiento de las mejoras construidas. Además, que es posible operar dicho equipo y llevar a cabo una práctica de laboratorio satisfactoriamente, utilizando como guía los manuales aportados por el presente trabajo.



Figura 74. Rociador de la torre de enfriamiento en funcionamiento.

8. Beneficios teórico-prácticos y limitaciones de la Práctica Dirigida de Graduación

Al momento de finalización de la práctica, se pueden citar diversos retos encontrados y beneficio obtenido de esta. Entre estos puntos destacan las facilidades, dificultades y el beneficio obtenido.

Entre las facilidades se puede citar la ayuda que se obtuvo del excelente comité asesor de esta Práctica, ya que la ayuda que cada uno de los profesores aportó en su campo fue determinante para el desarrollo del trabajo. Por otra parte, otra facilidad encontrada fue la ayuda brindada tanto dentro, como fuera de la Escuela de Ingeniería Química; ya que en la Universidad de Costa Rica, todas las áreas de trabajo siempre se encuentran dispuestas a colaborar a los estudiantes con sus necesidades. Es así que la Escuela de Ingeniería Química atendió oportunamente todas las necesidades de esta Práctica Dirigida, y cuando la necesidad se escapó de sus competencias, se recibió ayuda atenta y oportuna por parte de otras dependencias, tales como el Taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el Taller de soplado de vidrio de la Escuela de Química, el Taller de Óptica, el Taller de Soldadura de la Sección de Mantenimiento y el Taller de la Escuela de Física.

Por último, se pueden citar dos facilidades personales; la primera es que se contaba con experiencia en construcción y en el uso de herramientas. Esto ayudó no solo a trabajar más eficientemente en el proceso meramente constructivo, sino también en la formulación de planes efectivos de cómo se llevaron a cabo estos procesos. La segunda facilidad personal, es que se contaba también con experiencia en programación debido a trabajos realizados en cursos anteriores, por lo que la tarea de colocación y programación de los sensores, aunque no se consideró sencilla, se llevó a cabo satisfactoriamente.

Como dificultades, se puede citar los tiempos de entrega al comprar artículos, no solo los que vienen del extranjero, sino también dentro del país, pero que requieren construcción

por parte de algún fabricante ajeno a la Universidad. Aunque es sabido que estos tiempos de espera son largos y se toman en cuenta con anticipación, cualquier eventualidad puede extenderlos por un tiempo no contemplado aún mayor. Una dificultad personal encontrada, fue la transición hacia la realización de un proyecto de tal magnitud, de manera individual; esto después de todos los años de carrera de trabajo en equipo. Esto ocasionó que en varios momentos, el tiempo real que tomó llevar a cabo una tarea, fuera considerablemente mayor que el tiempo estimado en un principio, por lo que fue necesario el cambio y adaptación de los métodos personales de trabajo.

Como mayor beneficio de la Práctica Dirigida, se cita la construcción en sí misma de equipo para la realización de una tarea de ingeniería química, por las implicaciones que esto conlleva; se consideró que esto es la diferencia más importante con los trabajos de los cursos teóricos de la carrera. Ya que en estos, generalmente el fin es encontrar qué se tiene que hacer para lograr un objetivo (introducir agua, introducir aire, calentar, etcétera), y las condiciones a las que un proceso se debe llevar a cabo (como por ejemplo volumen, temperatura o concentraciones). Sin embargo, la construcción de equipo implica otro enfoque de trabajo totalmente distinto, en el que, para cada paso a dar, se debe responder a la pregunta “¿Cómo se va a hacer?”. Esto ayuda al estudiante a diferenciar entre lo que se puede diseñar pero no se puede construir, de lo que sí se puede construir; y a dimensionar el esfuerzo que esto va a requerir, así como anticipar las dificultades que puedan surgir en el proceso.

9. Conclusiones y recomendaciones

9.1. Conclusiones

- Se construyó un nuevo módulo de torre de pared húmeda y sus mejoras incluyeron:
 - Cambio de la columna principal
 - Cambio y rediseño de la columna secundaria
 - Colocación de sensores y creación de un programa para la automatización de la toma de datos
 - Construcción de reservorios de agua nuevos
 - Fijación del tanque al marco del equipo
- Las acciones de mejoras al módulo de torre de pared húmeda tuvieron un costo aproximado de 180 000 colones.
- Se remodeló el módulo de tanque agitado con aireación y sus acciones de mejora incluyeron:
 - Construcción de burbujeador nuevo
 - Colocación de mamparas al tanque
 - Cambio en la forma de introducción de gas
 - Rediseño, cambio y fijación de tuberías
 - Cambio del diseño de la tapa
 - Creación de programa para la automatización de la recolección de datos
 - Cambio de la superficie de trabajo
 - Cambio del brazo del motor
 - Cambio de la superficie de trabajo.
- Las acciones de mejoras al módulo de tanque agitado con aireación tuvieron un costo aproximado de 207 000 colones.
- Se realizaron acciones de mejora a la torre de enfriamiento, las cuales incluyeron:

- Dimensionamiento y colocación de rotámetro nuevo
 - Diseño, construcción y colocación de un dispositivo rociador
 - Fijación de tuberías
 - Construcción de paletas deflectoras y corrección de fugas
 - Mantenimiento del equipo
- Las acciones de mejoras al módulo de torre de enfriamiento tuvieron un costo aproximado de 197 000 colones.
 - Se concluyó que la mejora de realizar el aumento de la potencia de calentamiento a la torre de enfriamiento es temporalmente inviable.

9.2. Recomendaciones

- Se recomienda operar la torre de pared húmeda y el tanque agitado con aireación utilizando agua destilada para evitar la formación de incrustaciones de dureza en la columna, que puedan alterar la película de agua o el deterioro de las piezas de acrílico.
- Al dar mantenimiento al módulo de torre de pared húmeda, se recomienda utilizar jabón líquido para platos, para realizar el lavado de la columna y reservorios de agua. No se recomienda utilizar jabón sólido, ya que este tiende a formar sedimentos en el fondo de los reservorios.
- Para aumentar la potencia de calentamiento, se recomienda volver al uso de vapor y no aumentar la potencia eléctrica. Esto debido a que lo necesario para poder hacer uso de vapor es la construcción de la tubería de retorno de condensados faltante en el laboratorio, mientras que el aumento de la potencia eléctrica requiere diseño de un ramal nuevo, con su respectivo disyuntor, con la consecuente utilización de cable de gran calibre y por ende, gran inversión.

- Se recomienda explorar las posibilidades nuevas que ofrecen los equipos para estudiar fenómenos distintos a los actualmente descritos en las prácticas de laboratorio, por ejemplo:
 - Se recomienda el estudio del tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario en el módulo de pared húmeda
 - Se recomienda la modificación y operación del módulo de torre de pared húmeda a co-corriente
- Se recomienda considerar la compra de una torre de enfriamiento de escala de laboratorio o la construcción de una nueva en proyectos futuros. Esto debido a que los dos problemas sin solucionar en este equipo, los cuales son baja potencia de calentamiento y humidificación del aire dentro del laboratorio, son ocasionados principalmente por el gran tamaño de dichos equipos. Todos los módulos comerciales consultados, poseen una potencia de calentamiento menor a los 2 kW, por el reducido tamaño de dichos equipos; esta es una potencia fácilmente alcanzable en el laboratorio.

10.Nomenclatura

Letras mayúsculas

<i>A</i>	Área, m ²
<i>B</i>	Parámetro de correlación, adim
<i>C</i>	Concentración, mol L ⁻¹
<i>C_o</i>	Coefficiente de orificio, adim
<i>C_p</i>	Capacidad calorífica, kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
<i>C_s</i>	Calor húmedo, kJ kg ⁻¹ de aire seco
<i>D</i>	Diámetro, m
<i>D_f</i>	Difusividad, m ² s ⁻¹
<i>F</i>	Flujo transferido, kg s ⁻¹
<i>G'</i>	Flujo másico de aire por unidad de área transversal, kg m ⁻² s ⁻¹
<i>H</i>	Entalpía, kJ kg ⁻¹
<i>H_{toG}</i>	Altura de unidad de transferencia, m
<i>HR</i>	Humedad relativa, %
<i>K_La</i>	Coefficiente volumétrico global de transferencia de masa en la fase líquida, mol m ⁻² s ⁻¹
<i>K_y</i>	Coefficiente global de transferencia de masa en la fase gaseosa, mol m ⁻² s ⁻¹
<i>L</i>	Longitud de la columna, m
<i>L'</i>	Flujo másico de agua por unidad de área transversal, kg m ⁻² s ⁻¹
<i>M_a</i>	Masa molar del aire, g mol ⁻¹
<i>M_w</i>	Masa molar del agua, g mol ⁻¹
<i>N</i>	Flux molar, mol m ⁻²
<i>N_{toG}</i>	Número de unidades de transferencia, adim
<i>P</i>	Presión, Pa
<i>R</i>	Constante universal del gas ideal, J K ⁻¹ mol ⁻¹
<i>Re</i>	Número de Reynolds, adim
<i>Sc</i>	Número de Schmidt, adim

Sh	Número de Sherwood, adim
T	Temperatura, °C
V	Volumen, m ³
\dot{V}	Flujo volumétrico, m ³ s ⁻¹
V_H	Volumen húmedo, m ³ kg ⁻¹
Z	Altura de transferencia de la torre, m

Letras minúsculas

a	Área de transferencia por unidad de volumen, m ² m ⁻³
f	Factor de fricción de Fanning, adim
g	Aceleración de la gravedad, m s ⁻²
kp	Constante de retraso de la probeta, s ⁻¹
ky	Coefficiente local de transferencia de masa en la fase gaseosa, mol m ⁻² s ⁻¹
n	Cantidad, adim
ρ	Parámetro de correlación
t	tiempo, s
v	Velocidad, m s ⁻¹
y	Fracción molar, adim

Letras griegas

Γ	Flujo másico por unidad de grosor de película, kg s ⁻¹ m ⁻¹
α	Parámetro de correlación, adim
β	Parámetro de correlación, adim
γ	Parámetro de correlación, adim
δ	Espesor de la película, m
λ	Calor latente de vaporización, kJ kg ⁻¹
μ	Viscosidad, Pa s
ρ	Densidad, kg m ⁻³
τ	Tiempo característico del sensor, s

Superíndices

- * Se refiere al estado de equilibrio
- sat* Se refiere al estado de saturación

Subíndices

- 0* Se refiere al estado de referencia
- 1* Se refiere a la parte baja de la torre
- 2* Se refiere a la parte alta de la torre
- A* Se refiere a la sustancia A
- a* Se refiere al aire
- atm* Se refiere a la presión atmosférica
- c* Se refiere a la columna
- D* Se refiere al depósito
- ex* Se refiere a externo
- G* Se refiere al gas
- H* Se refiere a húmedo
- h* Se refiere a hidráulico
- i* Se refiere a la interfaz
- in* Se refiere a interno
- L* Se refiere a la fase líquida
- LM* Se refiere a la media logarítmica media
- max* Se refiere al estado máximo
- min* Se refiere al estado mínimo
- o* Se refiere a orificio
- p* Se refiere a probeta
- prom* Se refiere a promedio
- s* Se refiere a calor húmedo
- T* Se refiere a total
- t* Se refiere a transversal
- w* Se refiere al agua

y Se refiere a la fase gaseosa

Bibliografía

- Armfield. (2 de Setiembre de 2018). *CE Series – Chemical Engineering*. Obtenido de Armfield: <https://armfield.co.uk/product/ce-series-chemical-engineering/>
- Armfield. (2 de Setiembre de 2018). *UOP6 MKII – Computer Controlled Water Cooling Tower*. Obtenido de Armfield: https://armfield.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/UOP6_MkII_Datasheet_web.pdf
- Brown, W. (2001). Developing the best correlation for estimating the transfer of oxygen from air to water. *Chemical Engineering Education*.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos*. Mexico: McGraw Hill.
- Chain, E., Paladino, S., Callow, D., Ugolini, F., & Sluis, J. (1952). Studies on aeration. *Bulletin of the World Health Organization*, 73-97.
- Chisti, Y., & Young, M. (1993). Aeration and mixing in vortex fermenters. *Journal of Technology and Biotechnology*, 331-336.
- Coulson, J., & Richardson, J. (1999). *Chemical Engineering*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Edibon. (2 de Setiembre de 2018). *Columna de Absorción de Gases Pelicular*. Obtenido de Edibon: <https://www.edibon.com/es/equipment/computer-controlled-wetted-wall-gas-absorption-column>
- Edibon. (2 de Setiembre de 2018). *Equipo de Aireación*. Obtenido de Edibon: <https://www.edibon.com/es/equipment/aeration-unit>
- Edibon. (2 de Setiembre de 2018). *Torre de Enfriamiento de Sobremesa*. Obtenido de Edibon: <https://www.edibon.com/es/equipment/bench-top-cooling-tower>
- García, F., & Gómez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, 153–176.

- Geankoplis, C. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. México: Compañía Editorial Continental.
- Gilliland, E., & Sherwood, T. (1934). Diffusion of vapors into air streams. *Industrial and engineering chemistry*, 516-523.
- Gunt. (2 de Setiembre de 2018). *CE 405 Falling film absorption* . Obtenido de Gunt Hamburg: <https://www.gunt.de/en/products/process-engineering/thermal-process-engineering/absorption-and-adsorption/falling-film-absorption/083.40500/ce405/glct-1:pa-148:ca-241:pr-46>
- Johnstone, H., & Pigford, R. (1942). Distillation in a wetted-wall column. *American Institute of Chemical Engineers*, 25-50.
- Kafesjian, R., Plank, C., & Gerhart, E. (1961). Liquid flow and gas phase mass transfer in wetted-wall towers. *American Institute of Chemical Engineers*, 463-466.
- Kelly, N., & Swenson, L. (1956). Comparative perfor-. *Chemical Engineering Progress*, 263–268.
- Kulkarni, A., Badgandi, S., & Joshi, J. (2009). Design of ring and spider type spargers for bubble column reactor: Experimental measurements and CFD simulation of flow and weeping. *Chemical engineering research and design*, 1612-1630.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mexico: McGraw Hill.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. New York: McGraw Hill.
- Sherwood, T., & Gilliland, E. (1934). Diffusion of vapors through gas films. *Industrial end engineering chemistry*, 1093-1096.

- Ticobirra. (8 de Abril de 2019). *Filtro difusor de gas 2 micras (carbonation stone)*. Obtenido de Ticobirra: <https://www.ticobirra.com/shop/product/equ-011-filtro-difusor-de-gas-2-micras-carbonation-stone-5437?ppg=18&search=difusor>
- Treybal, R. (1980). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mexico: McGraw Hill.

Apéndices

Apéndice A. Datos experimentales

A.1. Datos experimentales para la torre de pared húmeda

Cuadro 13. Datos medidos en la primera corrida en la torre de pared húmeda, a un flujo de aire de 15 L min^{-1} y uno de agua de $1000 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$.

Tiempo	Temperatura del aire salida	Humedad relativa salida	Temperatura del aire entrada	Humedad relativa entrada	Temperatura del agua entrada	Temperatura del agua salida	Presión atmosférica
t (s)	$T_{a,s}$ (°C)	HR _s (%)	$T_{a,e}$ (°C)	HR _e (%)	$T_{w,e}$ (°C)	$T_{w,s}$ (°C)	P_{atm} Pa
0.0	23.99	69.01	24.39	5.11	23.38	22.38	88529
5.0	24.02	69.32	24.36	5.10	23.38	22.44	88528
9.2	24.01	68.53	24.36	5.05	23.38	22.50	88524
13.4	24.02	68.63	24.38	5.07	23.44	22.50	88522
17.7	24.05	68.96	24.38	5.05	23.44	22.50	88522
22.0	24.04	68.65	24.34	5.04	23.44	22.50	88523
26.3	24.07	68.71	24.36	5.07	23.44	22.50	88525
30.5	23.99	69.80	24.35	5.04	23.44	22.50	88521
34.8	24.07	69.13	24.36	5.09	23.44	22.50	88525
39.1	24.02	69.21	24.34	5.09	23.44	22.44	88525
43.3	24.04	68.93	24.34	5.05	23.44	22.50	88520
47.6	24.02	70.20	24.34	4.98	23.44	22.50	88523
51.9	24.02	69.63	24.35	5.07	23.44	22.50	88515
56.4	23.99	69.80	24.34	4.96	23.44	22.50	88519
60.7	24.02	69.36	24.34	5.00	23.44	22.50	88515
65.0	24.02	69.24	24.31	4.95	23.50	22.44	88519
69.3	24.02	69.28	24.32	5.00	23.44	22.50	88515
73.6	24.01	68.80	24.32	4.93	23.44	22.50	88529
78.0	24.05	69.37	24.31	4.95	23.50	22.50	88520
82.3	24.01	69.65	24.31	4.88	23.50	22.56	88517
86.7	24.02	69.10	24.31	4.84	23.50	22.50	88517
91.1	24.04	68.77	24.34	4.89	23.44	22.50	88522

Debido a que se cuenta con datos para dieciocho corridas, se presentaron solo los de la primera, los demás se presentan en hojas de cálculo.

A.2. Datos experimentales para el tanque agitado con aireación

Cuadro 14. Datos medidos en la primera corrida para el tanque agitado.

Tiempo t (s)	Concentración de oxígeno disuelto C_L (ppm)	Flujo de aire \dot{V}_a (L/min)	Velocidad de agitación N (rev/min)
0	-0.01	7	1200
5.1	-0.01	7	1200
10.3	-0.01	7	1200
15.5	-0.01	7	1200
20.7	-0.01	7	1200
25.9	-0.01	7	1200
31.2	-0.01	7	1200
36.4	0.01	7	1200
41.6	0.29	7	1200
46.8	0.78	7	1200
51.9	1.12	7	1200
57.1	1.61	7	1200
62.3	2.03	7	1200
67.5	2.31	7	1200
72.7	2.67	7	1200
77.9	2.88	7	1200
83.2	3.15	7	1200
88.5	3.37	7	1200
93.8	3.52	7	1200
99.2	3.7	7	1200
104.5	3.83	7	1200
110	3.91	7	1200
115.4	4.02	7	1200
120.8	4.1	7	1200

Cuadro 14 Continuación. Datos medidos en la primera corrida para el tanque agitado.

Tiempo t (s)	Concentración de oxígeno disuelto C_L (ppm)	Flujo de aire \dot{V}_a (L/min)	Velocidad de agitación N (rev/min)
126.1	4.17	7	1200
131.4	4.22	7	1200
136.8	4.27	7	1200
142.2	4.3	7	1200
147.6	4.35	7	1200
153.1	4.38	7	1200
158.5	4.39	7	1200
163.9	4.41	7	1200
169.4	4.43	7	1200
174.8	4.44	7	1200
180.3	4.46	7	1200
185.7	4.48	7	1200
191.2	4.48	7	1200
196.7	4.49	7	1200
202.2	4.49	7	1200
207.8	4.51	7	1200
213.4	4.51	7	1200
219	4.51	7	1200
224.7	4.51	7	1200
230.3	4.53	7	1200
236.3	4.53	7	1200
242.1	4.53	7	1200

Debido a que la Raspberry hace una medición cada segundo aproximadamente, para la corrida anterior se presentaron únicamente los datos medidos cada cinco segundos. Además, ya que se cuenta con doce corridas, y que algunas inclusive exceden los seiscientos segundos, solo se presentan los datos para la primera corrida. Las demás corridas se presentan en hojas de cálculo.

A.3. Datos experimentales para la torre de enfriamiento

Cuadro 15. Datos medidos en la operación de la torre de enfriamiento.

Flujo de agua	Velocidad del aire	Temperatura agua salida	Temperatura agua entrada	Temperatura aire entrada	Temperatura aire salida	Humedad relativa de entrada	Humedad relativa de salida
\dot{V}_w (L/min)	v_a (m/s)	$T_{w,s}$ (°C)	$T_{w,e}$ (°C)	$T_{a,e}$ (°C)	$T_{a,s}$ (°C)	HR_e (%)	HR_s (%)
7.5	0.86	30.00	43.50	24.90	29.20	72.00	100.00
	1.01						
	1.04						
	0.65						
12.5	0.45	32.5	43.5	24.6	33.00	74	100
	0.73						
	0.75						
	1.01						
17.5	0.77	35	43	23.1	35.70	83	100
	0.51						
	0.72						
	0.61						
22.5	0.91	35	44	22.9	36.60	86.7	100
	0.85						
	0.53						
	0.54						
22.5	0.65	35	44	22.9	36.60	86.7	100
	1.06						
	0.9						
22.5	0.49	35	44	22.9	36.60	86.7	100
	0.9						

Apéndice B. Datos intermedios

B.1. Datos intermedios para la torre de pared húmeda

Cuadro 16. Datos generales para el experimento de torre de pared húmeda.

Diámetro interno de columna, D_{in} (m)	0.032
Altura de columna, L (m)	0.99
Espesor de película, δ (m)	0.00036
Diámetro libre, D_G (m)	0.03127
Área transversal libre, A_G (m ²)	0.0007680
Área de transferencia, A_{tf} (m ²)	0.09726
Flujo de agua, \dot{V}_w (m ³ /s)	0.0000167
Densidad del agua, ρ_w (kg/m ³)	997.6456
Viscosidad del agua, μ_w (kg/m s)	0.0009518
Presión atmosférica, P_{atm} (Pa)	88537
Densidad del aire, ρ_a (kg/m ³)	1.1909
Viscosidad del aire, μ_a (kg/m s)	0.0000183
Difusividad del agua en aire, $D_{f_{w-a}}$ (m ² /s)	0.0000254

Cuadro 17. Presiones de saturación y presiones parciales de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Presión de saturación, aire de entrada	Presión de saturación, aire de salida	Presión de saturación a $T_{w,e}$	Presión de saturación a $T_{w,s}$	Presión parcial del aire de entrada	Presión parcial del aire de salida
\dot{V}_a (L/min)	$p^{sat}_{a,e}$ (Pa)	$p^{sat}_{a,s}$ (Pa)	$p^{sat}_{w,e}$ (Pa)	$p^{sat}_{w,s}$ (Pa)	$\bar{P}_{a,e}$ (Pa)	$\bar{P}_{a,s}$ (Pa)
15	3112	3055	2862	2700	155	2163
20	2780	2773	2702	2563	162	1987
25	3024	2934	2854	2681	155	2112
30	2796	2771	2710	2558	167	2018
35	2979	2912	2841	2658	152	2075

Cuadro 17 Continuación. Presiones de saturación y presiones parciales de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Presión de saturación, aire de entrada	Presión de saturación, aire de salida	Presión de saturación a $T_{w,e}$	Presión de saturación a $T_{w,s}$	Presión parcial del aire de entrada	Presión parcial del aire de salida
\dot{V}_a (L/min)	$p^{sat}_{a,e}$ (Pa)	$p^{sat}_{a,s}$ (Pa)	$p^{sat}_{w,e}$ (Pa)	$p^{sat}_{w,s}$ (Pa)	$\bar{P}_{a,e}$ (Pa)	$\bar{P}_{a,s}$ (Pa)
40	2805	2776	2722	2554	154	2000
45	2949	2892	2833	2639	148	2045
50	2827	2797	2763	2631	151	1967
55	2921	2875	2827	2620	157	1998
60	2828	2801	2769	2571	152	1943
65	2861	2852	2825	2605	152	1945
70	2822	2799	2770	2569	150	1914
75	2926	2866	2813	2601	155	1904
80	2782	2784	2774	2562	149	1867
85	2729	2756	2765	2540	146	1857
90	2772	2778	2774	2551	148	1835
95	2725	2755	2768	2538	147	1821
100	2739	2763	2774	2539	145	1808

Cuadro 18. Fracciones molares de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Fracción molar en aire de entrada	Fracción molar en aire de salida	Fracción molar en la interfaz en entrada	Fracción molar en la interfaz en salida	Media logarítmica de fracciones molares
Q_a (L/min)	$y_{G e}$ (adim)	$y_{G s}$ (adim)	$y_{i e}$ (adim)	$y_{i s}$ (adim)	$(y_i - y_G)_{LM}$ (adim)
15	0.00175	0.0244	0.0323	0.0305	0.0151
20	0.00183	0.0224	0.0305	0.0289	0.0150
25	0.00175	0.0239	0.0322	0.0303	0.0165

Cuadro 18 Continuación. Fracciones molares de agua para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Fracción molar en aire de entrada	Fracción molar en aire de salida	Fracción molar en la interfaz en entrada	Fracción molar en la interfaz en salida	Media logarítmica de fracciones molares
Q_a	y_{Ge}	y_{Gs}	y_{ie}	y_{is}	$(y_i - y_G)_{LM}$
(L/min)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
30	0.00189	0.0228	0.0306	0.0289	0.0155
35	0.00172	0.0234	0.0321	0.0300	0.0166
40	0.00174	0.0226	0.0307	0.0288	0.0158
45	0.00167	0.0231	0.0320	0.0298	0.0167
50	0.00171	0.0222	0.0312	0.0297	0.0171
55	0.00177	0.0226	0.0319	0.0296	0.0170
60	0.00171	0.0220	0.0313	0.0290	0.0174
65	0.00172	0.0220	0.0319	0.0294	0.0173
70	0.00170	0.0216	0.0313	0.0290	0.0170
75	0.00175	0.0215	0.0318	0.0294	0.0175
80	0.00168	0.0211	0.0313	0.0289	0.0174
85	0.00165	0.0210	0.0312	0.0287	0.0173
90	0.00167	0.0207	0.0313	0.0288	0.0176
95	0.00166	0.0206	0.0313	0.0287	0.0174
100	0.00163	0.0204	0.0313	0.0287	0.0178

Cuadro 19. Datos de humedad, volumen húmedo y flujo del aire para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Humedad de entrada	Humedad de salida	Volumen húmedo de entrada	Volumen húmedo de salida	Flujo másico de aire
\dot{V}_a	Y_e	Y_s	V_{He}	V_{Hs}	G
(L/min)	(kg _{agua} /kg _{AS})	(kg _{agua} /kg _{AS})	(m ³ /kg)	(m ³ /kg)	(kg/s)
15	0.00109	0.0156	0.967	0.989	0.000258
20	0.00114	0.0143	0.962	0.982	0.000347
25	0.00109	0.0152	0.966	0.986	0.000431

Cuadro 19 Continuación. Datos de humedad, volumen húmedo y flujo del aire para cada corrida en la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Humedad de entrada	Humedad de salida	Volumen húmedo de entrada	Volumen húmedo de salida	Flujo másico de aire
\dot{V}_a	Y_e	Y_s	V_{He}	V_{Hs}	G
(L/min)	(kg _{agua} /kg _{AS})	(kg _{agua} /kg _{AS})	(m ³ /kg)	(m ³ /kg)	(kg/s)
30	0.00118	0.0145	0.962	0.982	0.000520
35	0.00107	0.0149	0.965	0.985	0.000604
40	0.00108	0.0144	0.962	0.982	0.000693
45	0.00104	0.0147	0.965	0.985	0.000778
50	0.00106	0.0141	0.962	0.982	0.000866
55	0.00110	0.0144	0.964	0.984	0.000951
60	0.00107	0.0140	0.962	0.982	0.00104
65	0.00107	0.0140	0.963	0.983	0.00113
70	0.00106	0.0137	0.962	0.981	0.00121
75	0.00109	0.0137	0.964	0.982	0.00130
80	0.00105	0.0134	0.961	0.981	0.00139
85	0.00103	0.0133	0.960	0.980	0.00148
90	0.00104	0.0132	0.961	0.980	0.00156
95	0.00103	0.0131	0.960	0.979	0.00165
100	0.00102	0.0130	0.961	0.979	0.00174

Cuadro 20. Flux de agua transferido y coeficiente de transferencia de masa medido para cada corrida de la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Flujo másico de agua transferida	Flux másico de agua	Flux molar de agua	Coeficiente de transferencia de masa
\dot{V}_a	F_w	N_w	\bar{N}_w	K_y
(L/min)	(kg/s)	(kg/m ² s)	(mol/m ² s)	(mol/m ² s)
15	0.00000374	0.0000385	0.00214	0.141
20	0.00000456	0.0000469	0.00260	0.173
25	0.00000609	0.0000626	0.00347	0.211
30	0.00000693	0.0000713	0.00395	0.255

Cuadro 20 Continuación. Flux de agua transferido y coeficiente de transferencia de masa medido para cada corrida de la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Flujo másico de agua transferida	Flux másico de agua	Flux molar de agua	Coefficiente de transferencia de masa
\dot{V}_a (L/min)	F_w (kg/s)	N_w (kg/m ² s)	\bar{N}_w (mol/m ² s)	K_y (mol/m ² s)
35	0.00000838	0.0000861	0.00478	0.288
40	0.00000922	0.0000947	0.00526	0.333
45	0.00001063	0.000109	0.00607	0.363
50	0.00001132	0.000116	0.00646	0.377
55	0.00001261	0.000130	0.00719	0.424
60	0.00001340	0.000138	0.00764	0.438
65	0.00001452	0.000149	0.00828	0.478
70	0.00001538	0.000158	0.00878	0.517
75	0.00001632	0.000168	0.00931	0.531
80	0.00001713	0.000176	0.00977	0.562
85	0.00001814	0.000187	0.01035	0.598
90	0.00001892	0.000194	0.01079	0.613
95	0.00001984	0.000204	0.01132	0.650
100	0.00002073	0.000213	0.01183	0.665

Cuadro 21. Datos generales para la determinación de la correlación para la torre de pared húmeda.

Número de Schmidt	Flujo de agua por grosor de película	Factor de ajuste
Sc (adim)	Γ (kg/m s)	$4\Gamma/\mu$ (adim)
0.605	14.53	61050.6

Cuadro 22. Datos para la determinación de la correlación para la torre de pared húmeda.

Flujo de aire	Velocidad del aire	Número de Reynolds	Número de Sherwood predicho	Número de Sherwood medido	Coefficiente de transferencia de masa predicho
\dot{V}_a (L/min)	v_a (m/s)	Re (adim)	Sh_p (adim)	Sh_m (adim)	K_{yp} (mol/m ² s)
15	0.326	662.3	58.00	56.34	0.145
20	0.434	883.0	73.21	69.14	0.183
25	0.543	1103.8	87.70	84.33	0.220
30	0.651	1324.5	101.65	102.01	0.255
35	0.760	1545.3	115.16	115.06	0.288
40	0.868	1766.0	128.30	133.08	0.321
45	0.977	1986.8	141.14	144.97	0.353
50	1.085	2207.5	153.70	150.46	0.385
55	1.194	2428.3	166.03	169.46	0.416
60	1.302	2649.0	178.15	175.03	0.446
65	1.411	2869.8	190.07	190.86	0.476
70	1.519	3090.6	201.82	206.27	0.505
75	1.628	3311.3	213.41	211.99	0.534
80	1.736	3532.1	224.86	224.54	0.563
85	1.845	3752.8	236.17	238.74	0.591
90	1.953	3973.6	247.35	244.86	0.619
95	2.062	4194.3	258.42	259.65	0.647
100	2.170	4415.1	269.38	265.70	0.675

B.2. Datos intermedios para el tanque agitado con aireación

Cuadro 23. Datos de calibración del sensor de oxígeno disuelto.

Corrida	Constante de rezago del sensor	Tiempo característico del sensor
	K_p (1/s)	τ_p (s)
1	0.0190	52.6

Cuadro 23 Continuación. Datos de calibración del sensor de oxígeno disuelto.

Corrida	Constante de rezago del sensor		Tiempo característico del sensor
	K_p (1/s)	τ_p (s)	
2	0.0196	51.0	
3	0.0181	55.2	
Promedio	0.0189	52.9	

Cuadro 24. Datos obtenidos del coeficiente de transferencia de masa corregido y sin corregir por la constante de rezago del sensor.

Velocidad de agitación	Flujo de aire	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa sin corregir	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa de correlación
N (1/s)	\dot{V}_a (m ³ /s)	$K_L a$ (1/s)	$K_L a$ (1/s)	$K_L a$ (1/s)
6.67	0.067	0.0080	0.0054	0.0099
6.67	0.117	0.0128	0.0073	0.0123
6.67	0.167	0.0144	0.0078	0.0141
13.33	0.067	0.0205	0.0095	0.0221
13.33	0.117	0.0278	0.0109	0.0274
13.33	0.167	0.0327	0.0118	0.0314
20.00	0.067	0.0392	0.0128	0.0352
20.00	0.117	0.0382	0.0126	0.0437
20.00	0.167	0.0519	0.0142	0.0502

Cuadro 25. Parámetros de ajuste para la correlación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en tanque agitado.

α (adim)	β (adim)	γ (adim)
0.0031	0.385	1.155

Cuadro 26. Residuos para el ajuste del modelo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en tanque agitado.

Velocidad de agitación N (1/s)	Flujo de aire \dot{V}_a (m ³ /s)	Residuos	Residuos cuadrados	Suma
6.67	0.067	-0.001862363	0.0000035	
6.67	0.117	0.000551465	0.0000003	
6.67	0.167	0.000317797	0.0000001	
13.33	0.067	-0.001549551	0.0000024	
13.33	0.117	0.000442555	0.0000002	0.000057
13.33	0.167	0.001323401	0.0000018	
20.00	0.067	0.003940436	0.0000155	
20.00	0.117	-0.005497626	0.0000302	
20.00	0.167	0.001778305	0.0000032	

B.3. Datos intermedios para la torre de enfriamiento

Cuadro 27. Datos de presión de saturación y humedad para la corriente de aire.

Corrida	Velocidad del aire v_a (m/s)	Presión de saturación de entrada p^{sat}_e (kPa)	Presión de saturación de salida p^{sat}_s (kPa)	Humedad de saturación de entrada γ^{sat}_e (kg _w /kg _{AS})	Humedad de saturación de salida γ^{sat}_s (kg _w /kg _{AS})	Humedad de entrada Y_e (kg _w /kg _{AS})
1	0.802	3.096	3.994	0.0225	0.0293	0.0162
2	0.754	3.041	4.966	0.0221	0.0369	0.0163
3	0.724	2.776	5.776	0.0201	0.0433	0.0167
4	0.728	2.742	6.070	0.0198	0.0457	0.0172

Cuadro 28. Datos de la corriente gaseosa en la operación de la torre de enfriamiento.

Corrida	Densidad del aire	Flujo de aire por unidad de área	Entalpía del aire de entrada	Entalpía del aire de salida	Flujo de aire seco
	ρ_a	G'	$H_{a,e}$	$H_{a,s}$	G
	(kg/m ³)	(kg/m ² s)	(J/kg)	(J/kg)	(kg/s)
1	1.051	0.843	66341	104372	0.1141
2	1.052	0.793	66390	127807	0.1075
3	1.057	0.765	65701	147242	0.1039
4	1.058	0.770	66830	154310	0.1046

Cuadro 29. Datos para la curva de operación en cada corrida.

Corrida	Pendiente de la curva de operación	Intercepto de la curva de operación
	(J/kg °C)	(J/kg)
1	2766	-15944
2	5583	-115070
3	10193	-291044
4	9720	-273370

Cuadro 30. Datos de la curva de equilibrio.

Temperatura	Entalpia de la mezcla aire-agua
T (°C)	H (J/kg)
26.7	84000
29.4	97200
32.2	112100
35	128900
37.8	148200
40.6	172100

Cuadro 30 Continuación. Datos de la curva de equilibrio.

Temperatura T (°C)	Entalpía de la mezcla aire-agua H (J/kg)
43.3	197200
46.1	224500

Cuadro 31. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 1.

Temperatura del agua T_w (°C)	Entalpía en el equilibrio H^* (J/kg)	Entalpía del aire H (J/kg)	Fuerza impulsora H^*-H (J/kg)	$1/(H^*-H)$ (kg/J)	Área bajo la curva (adim)
29.75	98243	66341	31902	0.0000313	
32.50	113215	73947	39267	0.0000255	0.216
35.25	130729	81554	49175	0.0000203	0.174
38.00	150785	89160	61626	0.0000162	0.139
40.75	173385	96766	76619	0.0000131	0.111
43.50	198527	104372	94155	0.0000106	0.090

Cuadro 32. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 2.

Temperatura del agua T_w (°C)	Entalpía en el equilibrio H^* (J/kg)	Entalpía del aire H (J/kg)	Fuerza impulsora H^*-H (J/kg)	$1/(H^*-H)$ (kg/J)	Área bajo la curva (adim)
32.5	113215	66390	46825	0.000021	
34.7	127022	78673	48350	0.000021	0.258
36.9	142458	90956	51501	0.000019	0.246
39.1	159520	103240	56280	0.000018	0.228
41.3	178210	115523	62687	0.000016	0.207
43.5	198527	127807	70720	0.000014	0.185

Cuadro 33. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 3.

Temperatura del agua	Entalpía en el equilibrio	Entalpía del aire	Fuerza impulsora	$1/(H^*-H)$	Área bajo la curva
T_w (°C)	H^* (J/kg)	H (J/kg)	H^*-H (J/kg)	(kg/J)	(adim)
35	129031	65701	63331	0.000016	
36.6	140257	82009	58248	0.000017	0.269
38.2	152343	98317	54026	0.000019	0.291
39.8	165290	114626	50665	0.000020	0.312
41.4	179098	130934	48164	0.000021	0.330
43	193767	147242	46524	0.000021	0.345

Cuadro 34. Datos para la determinación del coeficiente de transferencia de masa en la corrida 4.

Temperatura del agua	Entalpía en el equilibrio	Entalpía del aire	Fuerza impulsora	$1/(H^*-H)$	Área bajo la curva
T_w (°C)	H^* (J/kg)	H (J/kg)	H^*-H (J/kg)	(kg/J)	(adim)
35	129031	66830	62202	0.000016	
36.8	141721	84326	57395	0.000017	0.293
38.6	155499	101822	53678	0.000019	0.315
40.4	170367	119318	51050	0.000020	0.334
42.2	186325	136814	49511	0.000020	0.348
44	203372	154310	49062	0.000020	0.355

Cuadro 35. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa para cada corrida en la torre de enfriamiento.

Flujo de agua	Unidades de transferencia	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
\dot{V}_a (L/min)	N_{toG} (adim)	$K_y a$ (kg/m ³ s)
7.5	0.73	0.342

Cuadro 35 Continuación. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa para cada corrida en la torre de enfriamiento.

Flujo de agua	Unidades de transferencia	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
\dot{V}_a (L/min)	N_{toG} (adim)	K_{ya} (kg/m ³ s)
12.5	1.12	0.496
17.5	1.55	0.658
22.5	1.65	0.704

Cuadro 36. Datos para la determinación de la correlación para el coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

Corrida	Flujo másico de agua L' (kg/m ² s)	Flujo másico de aire G' (kg/m ² s)	Coeficiente de transferencia de masa K_{ya} (kg/m ³ s)	Residuos	Suma de cuadrados
1	0.000255	0.233	0.338	-0.00425	
2	0.000425	0.219	0.503	0.00706	0.888
3	0.000595	0.212	0.655	-0.00268	
4	0.000765	0.213	0.704	-0.00052	

Cuadro 37. Parámetros de ajuste para la correlación para el coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

$c1$	$c2$	$c3$	$c4$	$c5$
1.63	0.49	-2.44	8.14	-1.55

Apéndice C. Muestra de cálculo

C.1. Muestra de cálculo para la torre de pared húmeda

C.1.1. Espesor de película

Se utilizan los datos del Cuadro 16, columna 2, filas 1, 7, 8, y 9.

$$\delta = \left(\frac{3 \cdot \dot{V}_a \cdot \mu_w}{\pi \cdot D_{in} \cdot \rho_w \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3 \cdot 0.0000167 \frac{m^3}{s} \cdot 0.000952 \frac{kg}{m \cdot s}}{\pi \cdot 0.032 m \cdot 997.646 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.00036 m \quad (61)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 16, columna 2, fila 3.

C.1.2. Presión de saturación del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 13, columna 4, fila 1.

$$\begin{aligned} p^{sat} &= \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right) \cdot \frac{101325 Pa}{mm Hg} \\ &= \exp\left(18.3036 - \frac{3816.44}{24.83 \text{ } ^\circ C - 46.13}\right) \cdot \frac{101325 Pa}{mm Hg} = 3112 Pa \end{aligned} \quad (62)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 17, columna 2, fila 1.

C.1.3. Presión parcial del agua en el aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 13, columna 5, fila 1, y Cuadro 17, columna 2, fila 3.

$$\bar{P} = HR \cdot p^{sat} = 4.99 \% \cdot 3112 Pa = 155 Pa \quad (63)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 17, columna 6, fila 1.

C.1.4. Fracción molar del agua en el aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 17, columna 6, fila 1.

$$y = \frac{\bar{P}}{P_{atm}} = \frac{155 Pa}{88537 Pa} = 0.00175 \quad (64)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 18, columna 2, fila 1.

C.1.5. Media logarítmica de las fracciones molares del agua en el aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 18, columna 6, fila 1.

$$(y_i - y_G)_{LM} = \left(\frac{((y_i - y_G)_1 - (y_i - y_G)_2)}{\ln \left(\frac{(y_i - y_G)_1}{(y_i - y_G)_2} \right)} \right) \quad (65)$$

$$= \left(\frac{((0.0305 - 0.00175) - (0.0323 - 0.0244))}{\ln \left(\frac{(0.0305 - 0.00175)}{(0.0323 - 0.0244)} \right)} \right) = 0.0151$$

El resultado se muestra en el Cuadro 18, columna 6, fila 1.

C.1.6. Humedad del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 17, columna 6, fila 1.

$$Y = \frac{\bar{P}}{P_{atm} - \bar{P}} \cdot \frac{M_w}{M_a} = \frac{155 \text{ Pa}}{88537 \text{ Pa} - 155 \text{ Pa}} \cdot \frac{18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.00109 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}} \quad (66)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 19, columna 2, fila 1.

C.1.7. Volumen húmedo del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 17, columna 2, fila 1, y Cuadro 13, columna 4, fila 1.

$$V_H = \left(\frac{1}{M_a} + \frac{Y}{M_w} \right) \cdot 22.41 \cdot \left(\frac{T + 273.15}{273.15} \right) \cdot \left(\frac{101325 \text{ Pa}}{P_{atm}} \right) \quad (67)$$

$$\left(\frac{1}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} + \frac{0.00109 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}}}{18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \right) \cdot 22.41 \cdot \left(\frac{24.83 \text{ °C} + 273.15 \text{ °C}}{273.15 \text{ °C}} \right) \cdot \left(\frac{101325 \text{ Pa}}{88537 \text{ Pa}} \right)$$

$$= 0.967 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 19, columna 4, fila 1.

C.1.8. Humedad del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 17, columna 6, fila 1.

$$Y = \frac{\bar{P}}{P_{atm} - \bar{P}} \cdot \frac{M_w}{M_a} = \frac{155 \text{ Pa}}{88537 \text{ Pa} - 155 \text{ Pa}} \cdot \frac{18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.00109 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}} \quad (68)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 19, columna 2, fila 1.

C.1.9. Flujo másico de agua transferido.

Se utilizan los datos del Cuadro 19, columnas 2, 3 y 6, fila 1.

$$F_w = G \cdot (Y_s - Y_e) = 0.000258 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(0.0156 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - 0.0156 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right) \quad (69)$$

$$F_w = 0.00109 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 20, columna 2, fila 1.

C.1.10. Área de transferencia.

Se utilizan los datos del Cuadro 16, columnas 2, filas 1, 2 y 3.

$$A_{tf} = (D_{in} - 2 \cdot \delta) \cdot \pi \cdot L = (0.032 \text{ m} - 2 \cdot 0.00036 \text{ m}) \cdot \pi \cdot 0.99 \text{ m} \quad (70)$$

$$A_T = 0.0972 \text{ m}^2$$

El resultado se muestra en el Cuadro 16, columna 2, fila 6.

C.1.11. Flux molar de agua transferido.

Se utilizan los datos del Cuadro 16, columna 2, fila 6, y Cuadro 20, columna 2, fila 1.

$$\bar{N}_w = \frac{F_w}{A_T} \cdot \frac{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{M_w} = \frac{0.00109 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.0972 \text{ m}^2} \cdot \frac{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{18.02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0.00214 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}} \quad (71)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 20, columna 4, fila 1.

C.1.12. Coeficiente de transferencia de masa.

Se utilizan los datos del Cuadro 18, columna 6, fila 1, y Cuadro 20, columna 4, fila 1.

$$K_y = \frac{\bar{N}_w}{(y_i - y_G)_{LM}} = \frac{0.00214 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}}{0.0151} = 0.141 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad (72)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 20, columna 5, fila 1.

C.1.13. Velocidad del aire.

Se utilizan los datos del

Cuadro 15, columna 2, fila 5.

$$v_a = \frac{\dot{V}_a}{A_G} = \frac{0.00025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.000768 \text{ m}^2} = 0.326 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (73)$$

El resultado se muestra en el

Cuadro 22, columna 2, fila 1.

C.1.14. Número de Reynolds para el flujo de aire.

Se utilizan los datos del

Cuadro 22, columna 2, fila 1, y del Cuadro 16, columna 2, filas 4, 11 y 12.

$$Re = \frac{\rho \cdot v_a \cdot D_G}{\mu_a} = \frac{1.1909 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.326 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.0313 \text{ m}}{0.0000183 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 662 \quad (74)$$

El resultado se muestra en el

Cuadro 22, columna 3, fila 1.

C.1.15. Número de Sherwood.

Se utilizan los datos del Cuadro 20, columna 5, fila 1, y del Cuadro 16, columna 2, filas 3 y 10.

$$Sh = \frac{K_y \cdot \delta \cdot R \cdot T}{D_{f_{w-a}} \cdot P_{atm}} = \frac{0.141 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}} \cdot 0.00036 \text{ m} \cdot 8314 \frac{\text{J}}{\text{K mol}} \cdot 296.45 \text{ K}}{0.0000254 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 88537 \text{ Pa}} = 56.34 \quad (75)$$

El resultado se muestra en el

Cuadro 22, columna 5, fila 1.

C.2. Muestra de cálculo para el tanque agitado.

C.2.1. Constante de rezago del sensor.

Para determinar la constante de rezago del sensor, se utilizó el programa *Excel* para graficar los datos de $\ln\left(1 - \frac{C_L}{C_L^{sat}}\right)$ contra el tiempo, con lo cual se obtuvo la gráfica de la Figura 75.

La pendiente de esta gráfica tiene el valor de $-k_p$.

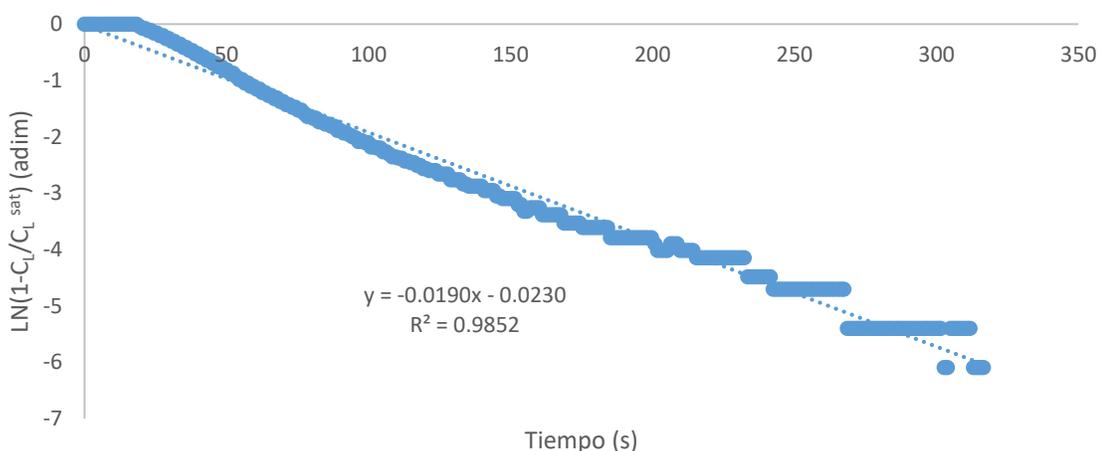


Figura 75. Muestra de cálculo de la constante de rezago del sensor.

El resultado se muestra en el Cuadro 23, columna 2, fila 1.

C.2.2. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, considerando el efecto del sensor.

Para esto, se utilizó la herramienta *Solver* del programa *Excel*, con la cual se hizo uso del método de la minimización de los cuadrados de los residuos, para ajustar los datos de concentración de oxígeno disuelto medidos, al modelo descrito por la Ecuación (76). Se varió el valor de $K_L a$, hasta encontrar el de mejor ajuste.

$$C_p = C_L^{sat} \cdot \left(1 + \frac{K_L a}{k_p - K_L a} e^{-k_p \cdot t} - \frac{k_p}{k_p - K_L a} e^{-K_L a \cdot t} \right) \quad (76)$$

El resultado de la primera corrida se muestra en el Cuadro 24, columna 3, fila 1.

C.2.3. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, sin considerar el efecto del sensor.

Para esto, se utilizó la herramienta *Solver* del programa *Excel*, con la cual se hizo uso del método de la minimización de los cuadrados de los residuos, para ajustar los datos de concentración de oxígeno disuelto medidos, al modelo descrito por la Ecuación (77). Se varió el valor de $K_L a$, hasta encontrar el de mejor ajuste.

$$C_p = C_L^{sat} \cdot (1 - e^{-K_L a \cdot t}) \quad (77)$$

El resultado de la primera corrida se muestra en el Cuadro 24, columna 4, fila 1.

C.2.4. Parámetros de ajuste para la correlación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

Para esto, se utilizó la herramienta *Solver* del programa *Excel*, con la cual se hizo uso del método de la minimización de los cuadrados de los residuos, para ajustar los parámetros adimensionales, al modelo descrito por la Ecuación (78). Se varió el valor de flujo de aire y velocidad de agitación, hasta encontrar los valores de mejor ajuste. Se utilizaron los valores del Cuadro 24, columnas 1 y 2.

$$K_L a = \alpha \cdot \dot{V}_a^\beta \cdot N^\gamma \quad (78)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 25, fila 1.

C.3. Muestra de cálculo para la torre de enfriamiento.

C.3.1. Presión de saturación del aire.

Se utiliza el dato del

Cuadro 15, columna 5, fila 1.

$$p^{sat} = \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right) \cdot \frac{101.325 \text{ kPa}}{760 \text{ mm Hg}} \quad (79)$$

$$p^{sat} = \exp\left(18.3036 - \frac{3816.44}{(24.90 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 \text{ }^\circ\text{C}) - 46.13}\right) \cdot \frac{101.325 \text{ kPa}}{760 \text{ mm Hg}}$$

$$p^{sat} = 3.096 \text{ kPa}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 27, columna 3, fila 1.

C.3.2. Humedad de saturación del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 27, columna 3, fila 1.

$$Y^{sat} = \frac{p^{sat}}{P_{atm} - p^{sat}} \cdot \frac{M_w}{M_a} = \frac{3.096 \text{ kPa}}{88.520 \text{ kPa} - 3.096 \text{ kPa}} \cdot \frac{18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \quad (80)$$

$$Y^{sat} = 0.0225 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 27, columna 5, fila 1.

C.3.3. Humedad del aire

Se utilizan los datos del Cuadro 27, columna 5, fila 1.

$$Y = Y^{sat} \cdot HR = 0.0225 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}} \cdot 72\% = 0.0162 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}} \quad (81)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 27, columna 7, fila 1.

C.3.4. Densidad del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 27, columna 7, fila 1.

$$\rho_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{M_a} + \frac{Y}{M_w}\right) \cdot 22.41} \cdot \left(\frac{273.15}{T + 273.15}\right) \cdot \left(\frac{P_{atm}}{101325 \text{ Pa}}\right) \quad (82)$$

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} + \frac{0.0162 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg AS}}}{18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}\right) \cdot 22.41} \cdot \left(\frac{273.15 \text{ }^\circ\text{C}}{24.9 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 \text{ }^\circ\text{C}}\right) \cdot \left(\frac{88.52 \text{ kPa}}{101.3 \text{ kPa}}\right)$$

$$= 1.0231 \frac{kg}{m^3}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 28, columna 2, fila 1.

C.3.5. Entalpía del aire.

Se utilizan los datos del Cuadro 27, columna 7, fila 1.

$$H = c_s \cdot (T - T_0) + Y \cdot \lambda_0 \quad (83)$$

$$H = \left(1.005 \text{ kJ} + 1.88 \text{ kJ} \cdot 0.0162 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ AS}} \right) \cdot (24.9^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 0.0162 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ AS}} \cdot 2502 \text{ kJ}$$

$$H = 66.341 \frac{kJ}{kg}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 28, columna 4, fila 1.

C.3.6. Entalpía de la mezcla aire-agua en el equilibrio.

Para determinar este valor de entalpía, se utilizan datos de equilibrio para dicha mezcla respecto a la temperatura reportados por Perry (2008). Estos datos se ajustan a un polinomio de segundo grado, con el cual se interpola. Se utiliza la temperatura del agua requerida.

Se utilizan los datos del Cuadro 31, columna 1, fila 1.

$$H^* = 168.11 \cdot T_w^2 - 5021.04 \cdot T_w + 98827 \quad (84)$$

$$H^* = 168.11 \cdot 29.75^\circ\text{C}^2 - 5021.04 \cdot 29.75^\circ\text{C} + 98827$$

$$H^* = 98243 \frac{J}{kg}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 31, columna 2, fila 1.

C.3.7. Fuerza impulsora.

Se utilizan los datos del Cuadro 31, columnas 2 y 3, fila 1.

$$(H^* - H) = 98243 \frac{J}{kg} - 66341 \frac{J}{kg} = 31902 \frac{J}{kg} \quad (85)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 31, columna 4, fila 1.

C.3.8. Área bajo la curva.

Para calcular el N_{toG} se realiza una integración numérica, utilizando la regla del trapecio. Estas secciones luego se suman y se obtiene el número de unidades de transferencia, o N_{toG} .

Se utilizan los datos del Cuadro 31, columnas 3 y 5, filas 1 y 2.

$$\begin{aligned} \text{Área} &= \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H} & (86) \\ \text{Área} &= \frac{1}{2} \cdot \left(0.0000255 \frac{kg}{J} + 0.0000313 \frac{kg}{J} \right) \cdot \left(73947 \frac{J}{kg} - 66341 \frac{J}{kg} \right) \\ \text{Área} &= 0.216 \end{aligned}$$

El resultado se muestra en el Cuadro 31, columna 6, fila 1.

C.3.9. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

Se utilizan los datos del Cuadro 28, columna 3, fila 1, y del Cuadro 35, columnas 2, fila 1.

$$K_y a = \frac{G' \cdot N_{toG}}{Z} = \frac{0.843 \frac{kg}{m^2 s} \cdot 0.73}{1.8 m} = 0.342 \frac{kg}{m^3 s} \quad (87)$$

El resultado se muestra en el Cuadro 35, columna 3, fila 1.

Apéndice D: Guías de laboratorio

D.1. Guía de laboratorio para la práctica de torre de pared húmeda

Determinación del coeficiente de transferencia de masa en una torre de pared húmeda

Objetivo general

- Estudiar el fenómeno de transferencia de masa y el funcionamiento de una torre de pared húmeda

Objetivos específicos

- Encontrar el valor del coeficiente de transferencia de masa desde la fase líquida para distintos flujos de aire
- Hallar una correlación adimensional para los coeficientes de transferencia de masa

Nota teórica

Diversos son los equipos que ponen en contacto dos fases con el fin de alcanzar algún objetivo por medio de la transferencia de masa. Por ejemplo, los tanques de burbujeo llevan a cabo la disolución de un gas en un líquido con algún fin determinado, las torres de enfriamiento reducen la temperatura de una corriente líquida por medio de la evaporación de una pequeña parte de esta al ponerla en contacto con una corriente de gas insaturada y las torres rellenas llevan a cabo diversidad de procesos por medio del contacto entre una fase líquida y otra gaseosa. Sin embargo, todos estos equipos tienen la particularidad de que es extremadamente difícil o técnicamente imposible conocer con exactitud el área por la cual se da dicha transferencia de masa. A consecuencia de esto, en el proceso de análisis

de los fenómenos que ocurren en dichos equipos, es común utilizar coeficientes volumétricos de transferencia de masa k_{La} .

A diferencia de los equipos anteriores, la torre de pared húmeda tiene la particularidad de que se puede medir con precisión el área de transferencia de masa y con esto el coeficiente de transferencia de masa k_y . Este hecho, sumado a que este equipo se puede operar fácilmente en estado estacionario, lo hace ideal para tareas didácticas y de investigación, ya que los resultados obtenidos mediante estos equipos son la base para la obtención de correlaciones y el diseño de otros equipos tales como torres empacadas.

Una torre de pared húmeda se puede operar de dos maneras distintas principalmente:

- Una película de agua descendente absorbe un soluto presente en la corriente gaseosa. En este caso se mide la concentración de entrada y salida de dicho soluto en la corriente líquida. Como ejemplos se tienen la absorción de amoníaco presente en el aire o la oxigenación del agua.
- Una corriente de gas se utiliza para evaporar una película de un líquido puro, como el caso específico de esta práctica de laboratorio. En este caso se mide la humedad relativa en la entrada y salida de la corriente de aire.

Sin embargo, se han reportado casos en los que una película se hace pasar por el interior de un tubo soluble, por ejemplo ácido benzoico comprimido, donde se mide la concentración de esta sustancia en la corriente de entrada y salida de agua.

Las torres de pared húmeda tienen diversos usos industriales, tales como la absorción de ácido clorhídrico o diversos compuestos orgánicos presentes en una corriente gaseosa de desecho. Sin embargo es poco utilizado ya que presenta la desventaja de que normalmente se requieren de columnas de gran longitud, o la utilización de muchas columnas con flujos de gas muy elevados.

Modelos teóricos

En el caso de la evaporación de una película de un líquido puro por contacto con una corriente gaseosa, quizá el modelo matemático más conocido sea el presentado por Gilliland y Sherwood (1934), el cual se presenta a continuación:

$$Sh = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.44} \quad (1)$$

El cual tiene validez para valores de Reynolds de hasta 35000 para la corriente gaseosa y $0.6 < Sc < 2.5$. Sin embargo, al trabajar con valores experimentales, se puede preferir usar su forma lineal.

$$\ln Sh = \ln 0.023 + 0.83 \cdot \ln Re + 0.44 \cdot \ln Sc \quad (2)$$

Diversos autores han resaltado que los valores de transferencia de masa predichos por este modelo pueden diferir de los medidos experimentalmente a causa de los efectos provocados por ondulaciones en la película descendente debidas la tensión superficial del líquido o a efectos de entrada a la columna, por lo que dichos valores suelen requerir un ajuste. En el caso en que no se tiene una película lisa, sino que las ondulaciones son evidentes, se propone el modelo siguiente, utilizando las condiciones de la corriente gaseosa.

$$Sh = 0.00814 Re^{0.83} Sc^{0.44} \left(\frac{4\Gamma}{\mu} \right)^{0.15} \quad (3)$$

Investigación

- Investigue acerca de la teoría de la película laminar y la teoría de la penetración.
- Investigue acerca del fenómeno de transferencia de masa en el caso de tener evaporación de una corriente líquida pura y en el caso de la absorción en la corriente líquida de un soluto presente en el flujo de gas.

- Investigue acerca de los modelos para el cálculo de transferencia de masa en una torre de pared húmeda.
- Investigue acerca de los usos industriales que se le da a una torre de pared húmeda.

Procedimiento

1. Verifique que el tanque posee agua al menos hasta un tercio de su capacidad. Verifique que el equipo se encuentra conectado a la línea de aire comprimido del laboratorio.
2. Verifique que el rotámetro de agua se encuentra totalmente abierto y el de aire totalmente cerrado. Verifique además que la válvula de purga de la torre secundaria inferior se encuentra abierta.
3. Con la regleta apagada, verifique que se encuentran conectados a ella la bomba sumergible, la pantalla y la Raspberry Pi. Encienda la regleta cuando desee iniciar con la práctica y no la apague hasta haber finalizado con ella y apagado la Raspberry Pi correctamente.
4. Espere a que el agua empiece a descender por la columna y moje uniformemente toda su superficie interna. Alcanzado dicho punto verifique el flujo máximo entregado por la bomba y seleccione por medio del rotámetro un flujo intermedio para su trabajo, con esto intente minimizar la formación de ondulaciones en la película.
5. Abra lentamente el rotámetro de aire y seleccione un flujo de trabajo.
6. Abra el programa para la recolección de datos y ejecútelo. Déjelo correr hasta que verifique que ha alcanzado el estado estacionario por medio de la estabilización de las gráficas de temperatura y humedad relativa que se desplegarán en pantalla. Detenga la ejecución del código. Para sus cálculos, utilice los datos del estado estacionario.

7. Repita el paso 6 para otros 4 o 5 flujos de aire intentando utilizar todo el rango del rotámetro.
8. Finalizado su experimento, cierre la válvula principal de aire comprimido y luego el rotámetro de aire. Conecte un dispositivo USB a la Raspberry Pi y copie las hojas de cálculo recolectadas, asegúrese de borrarlas de la Raspberry Pi luego de haberlas copiado para evitar la acumulación de documentos. Apague la Raspberry Pi y luego apague y desconecte la regleta.

Utilización del programa de recolección de datos

1. Abra el programa, el cual se encontrará en una carpeta en el escritorio. No modifique el código.
2. Arranque el programa cuando esté listo para iniciar su experimento por medio del botón de ejecutar. Este le pedirá que le ingrese un nombre al experimento, este es el nombre que tendrá la hoja de cálculo que se guardará en la Raspberry Pi. Adicionalmente le pedirá que ingrese los valores de flujo de agua y aire con los que trabajará. Por último le pedirá que presione "Enter" para iniciar el experimento, en este punto iniciará la recolección de los datos.
3. En su pantalla se desplegarán dos gráficas, una de temperatura y otra de humedad relativa. Utilícelas para visualizar el alcance del estado estacionario. El programa realiza una medición cada 5 segundos aproximadamente.
4. Cuando haya finalizado su corrida presione el botón de "Detener" una vez para parar la recolección de datos, y una segunda vez para cerrar las gráficas.
5. Su experimento se guardará en la carpeta "Home" accesible directamente desde el menú superior de la pantalla de escritorio.

Resultados

- Calcule el coeficiente de transferencia de masa para cada corrida.

- Realice una correlación mediante una regresión múltiple con los datos obtenidos.
- Realice una comparación de datos predichos con el modelo contra los observados.
- Compare con información reportada en la literatura.

Discusión

- Analice el modelo empírico obtenido por medio del error estándar.
- Analice la dependencia del coeficiente de transferencia de masa respecto a los números adimensionales.
- Refiérase a errores experimentales.

Recuerde que las anteriores son sólo una guía y representa lo mínimo que debería incluir su discusión.

Bibliografía

Gilliland, R. y T, Sherwood. (1934). Diffusion of vapors through gas films. *Ind. Enp. Chem.* 26, 1093.

Gilliland, R. y T Sherwod. (1934). Diffusion of vapors into air streams. *Ind. Enp. Chem.*, 26, 516.

McCabe, W. (2002). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mexico: McGraw-Hill

Sherwood, T. (1975). *Mass Transfer*. New York: McGraw-Hill

Perry y Green. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. New York: McGraw-Hill

Treybal , R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill

Anexos

Diagrama de equipo

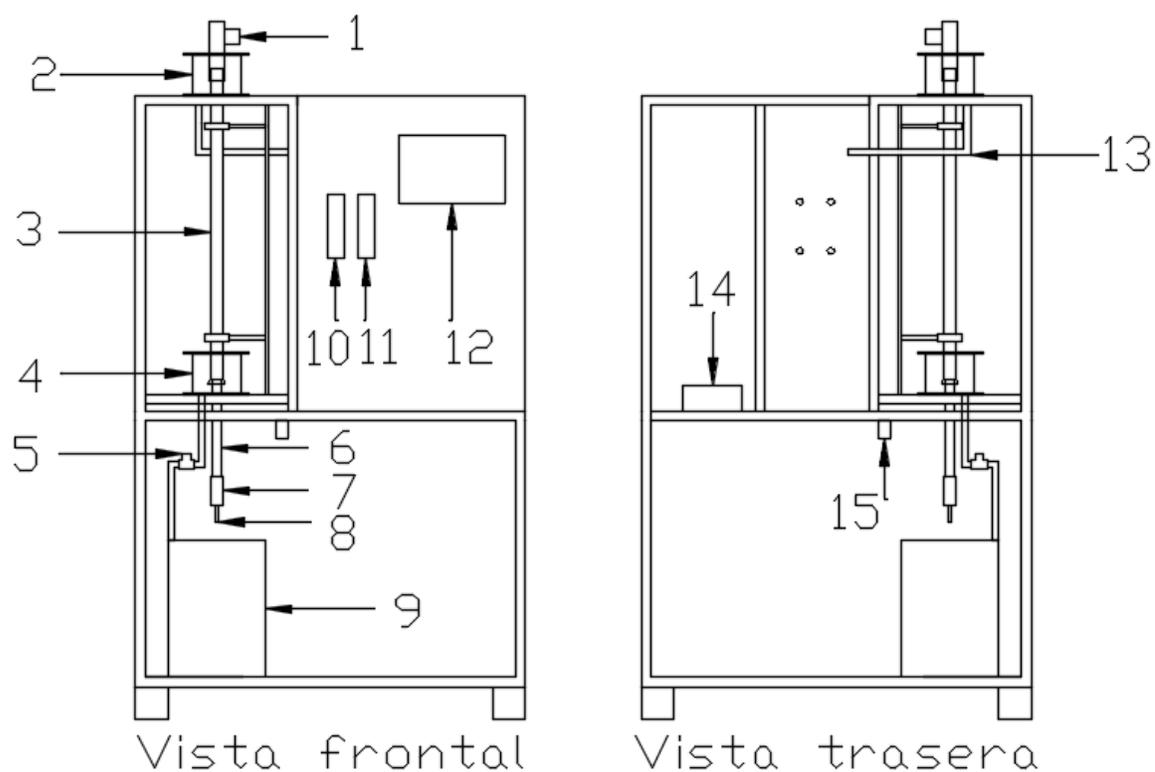


Figura 1. Diagrama del módulo de torre de pared húmeda.

Donde

- 1: Sensor de humedad relativa de salida
- 2: Depósito de agua superior
- 3: Columna principal
- 4: Depósito de agua inferior
- 5: Sensor de temperatura del agua de salida
- 6: Columna secundaria inferior
- 7: Sensor de humedad relativa de entrada
- 8: Válvula de purga
- 9: Tanque de agua y bomba sumergible
- 10: Rotámetro de agua
- 11: Rotámetro de aire
- 12: Pantalla
- 13: Sensor de temperatura del agua de entrada

14: Raspberry Pi

15: Regulador de presión del aire

Metodología de cálculo

Por convención, se llamará el punto 1 a la parte inferior de la columna, y el punto 2 a la parte superior. Es decir, las condiciones en el punto 1 corresponden a la temperatura del agua de salida y la temperatura y humedad relativa del aire de entrada. Por otra parte, las condiciones en el punto 2 corresponden a la temperatura del agua de entrada y a la temperatura y humedad relativa del aire de salida.

1. Cálculo del coeficiente de transferencia de masa, k_y .

Cálculo de la presión de saturación del agua

$$P^* = e^{18.3036 - \frac{3816.44}{(T+273.15)-46.13}}$$

Donde

P = Presión de saturación, mm Hg

T = Temperatura, °C

Se calcula a la temperatura del gas y del líquido en la entrada y la salida de la columna (4 datos en total)

Cálculo de la presión parcial de agua en el gas

$$P_{H_2O} = \frac{HR \cdot P^*}{100}$$

Donde

P_{H_2O} = Presión parcial, mm Hg

HR = Humedad relativa, %

Se calcula para las condiciones de entrada y salida de la corriente gaseosa.

Cálculo de la fracción mol de agua en la interfase

$$y_i = \frac{P^*}{P_T}$$

Donde

P_T = Presión ambiental, mm Hg

Se calcula utilizando la presión de saturación del líquido, tanto en la entrada como en la salida.

Cálculo de la fracción mol de agua en el gas

$$y_G = \frac{P_{H_2O}}{P_T}$$

Se calcula utilizando la presión parcial del agua en el gas, tanto en la entrada como en la salida gaseosa.

Cálculo de la media logarítmica de las fracciones mol

$$(y_i - y_G)_{LM} = \frac{(y_i - y_G)_1 - (y_i - y_G)_2}{\ln\left(\frac{(y_i - y_G)_1}{(y_i - y_G)_2}\right)}$$

Donde

$(y_i - y_G)_{LM}$ = Media logarítmica de las fracciones molares, adim

y_i = Fracción mol en la interfase, adim

y_G = Fracción mol en el gas, adim

1 = Condiciones en la parte inferior de la columna

2 = Condiciones en la parte superior de la columna

Cálculo del espesor de la película

$$\delta = \left(\frac{3 \cdot Q \cdot \mu}{\pi \cdot D \cdot \rho \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde

δ = Espesor de la película, m

Q = Flujo volumétrico de agua, $m^3 s^{-1}$

μ = Viscosidad del agua, $kg m^{-1} s^{-1}$

D = Diámetro interno de la columna, m

ρ = Densidad del agua, kg m^{-3}

g = Aceleración de la gravedad, m s^{-2}

Recordar que el diámetro interno de la columna utilizada es de 32 mm. Para las propiedades físicas se utilizan las del agua a la temperatura promedio.

Cálculo del área de transferencia de masa

$$A = \pi \cdot L \cdot (D - 2 \cdot \delta)$$

Donde

A = Área de transferencia, m^2

L = Longitud de la columna, m

Recordar que la longitud de la columna utilizada es de 0.99 m.

Cálculo de la humedad absoluta del aire

$$H = \frac{P^*}{P_T - P^*} \cdot \frac{M_A}{M_B}$$

Con $M_A = 18.02 \text{ kg/kmol}$ y $M_B = 28.97 \text{ kg/kmol}$

Donde

H = Humedad absoluta del aire, kg agua / kg aire

M_A = Masa molar del agua, kg kmol^{-1}

M_B = Masa molar del agua, kg kmol^{-1}

Se calcula para las condiciones de entrada y salida del aire.

Cálculo del volumen húmedo del aire

$$V_H = \left(\frac{1}{M_B} + \frac{H}{M_A} \right) \cdot 0.082 \cdot (T + 273.15) \cdot \frac{101325}{P_T}$$

Donde

T = Temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$

P_T = Presión atmosférica, Pa

V_H = Volumen húmedo, $\text{m}^3 \text{kg aire seco}^{-1}$

Se calcula para las condiciones del aire de entrada.

Cálculo del flujo másico de aire seco

$$G = \frac{v}{V_H} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_G^2$$

Donde

v = Velocidad del aire, m s^{-1}

D_G = Diámetro libre de la columna, m

Con $D_G = D - 2\delta$. Además, calcule la velocidad del aire utilizando la medición del rotámetro y el área libre de la columna. Cuide las unidades en sus cálculos.

Cálculo del flujo de transferencia

$$F = G(H_2 - H_1)$$

Donde

F = Flujo de transferencia, kg s^{-1}

Cálculo del flux

$$N = \frac{F}{A_T}$$

Donde

N = Flux, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Note que las unidades están en kg de agua, sin embargo para el siguiente cálculo se requiere el flux en términos de los moles de agua (preferiblemente gmol), por lo tanto, convierta este dato utilizando la masa molar del agua.

Cálculo del coeficiente de transferencia de masa

$$k_y = \frac{N}{(y_i - y_G)_{LM}}$$

Donde

N = Flux, mol m⁻² s⁻¹

k_y = Coeficiente de transferencia de masa, mol m⁻² s⁻¹

2. Cálculo de la correlación múltiple

Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_G}{\mu}$$

Donde

Re : Número de Reynolds, adim

μ : Viscosidad, kg m⁻¹ s⁻¹

D_G : Diámetro libre, m

v : Velocidad del aire, m s⁻¹

ρ : Densidad, kg m⁻³

Cálculo del número de Schmidt

$$Sc = \frac{\mu}{D_{AB} \cdot \rho}$$

Donde

Sc : Número de Schmidt, adim

μ : Viscosidad, kg m⁻¹ s⁻¹

D_{AB} : Difusividad de agua en aire, m² s⁻¹

ρ : Densidad, kg m⁻³

Utilice las propiedades del gas. La difusividad puede buscarla en tablas o utilizar el método de cálculo de las tablas de Gerardo Chacón.

Cálculo del número de Sherwood

$$Sh = \frac{k_y \cdot \delta \cdot R \cdot T}{D_{AB} \cdot P_T}$$

Donde

Sh : Número de Sherwood, adim

δ : Grosor de película, m

R : Constante de gas ideal, $J K^{-1} mol^{-1}$

T : Temperatura, K

P_T : Presión atmosférica, Pa

Cálculo del número Γ

$$\Gamma = \frac{\rho \cdot V}{\delta \cdot \pi}$$

Donde

Γ : Flujo de masa de líquido por unidad de ancho de la película, $kg m^{-1} s^{-1}$

ρ : Densidad del agua, $kg m^{-3}$

V : Flujo volumétrico de agua, $m^3 s^{-1}$

Modelo matemático

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^c \cdot \left(\frac{4\Gamma}{\mu}\right)^d$$

$$\ln Sh = a + b \cdot \ln(Re) + c \cdot \ln(Sc) + d \cdot \ln\left(\frac{4\Gamma}{\mu}\right)$$

Encuentre los valores de a, b, c y d para cualquiera de los modelos presentados, utilizando los métodos vistos en cursos anteriores. Luego haga una gráfica de predichos contra observados.

D.2. Guía de laboratorio para la práctica de tanque agitado con aireación

Determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en un tanque agitado con aireación

Objetivo general

- Estudiar el fenómeno de transferencia de masa en un tanque agitado con aireación y el funcionamiento de este equipo

Objetivos específicos

- Encontrar el valor del coeficiente volumétrico de transferencia de masa para distintos flujos de aire y velocidades de agitación.
- Hallar una correlación múltiple para los coeficientes de transferencia de masa.

Descripción del problema

Se presentará un modelo que describe la transferencia de masa en un tanque agitado con burbujeo de aire. Se harán corridas variando el flujo de aire alimentado y la velocidad de agitación y se hará una correlación del coeficiente determinado respecto a las variables mencionadas.

Nota teórica

El propósito de un tanque burbujeador es poner en contacto una fase líquida con una gaseosa con el fin de llevar a cabo la transferencia de masa. Este equipo no es adecuado cuando es requerido el efecto de contracorriente, sin embargo, es bastante útil para diversos procesos. Entre estos se encuentra el de aireación, útil para el tratamiento de aguas residuales o para proveer el oxígeno necesario en procesos de fermentación

aeróbica. Comúnmente, consiste en un tanque con un impulsor para proveer la agitación, preferiblemente de fondo redondo para evitar las zonas con ausencia de corrientes, provisto de un dispositivo en el fondo por donde se burbujea el aire. Este dispositivo se encuentra por debajo del impulsor y dependiendo del tamaño del tanque, puede ser simplemente un extremo abierto de tubería, sin embargo se prefiere una tubería circular en forma de anillo, de preferencia con un diámetro igual o más pequeño que el impulsor, perforada en su parte superior, en donde la separación entre orificios no debe ser menor que el diámetro de dicho orificio (Treybal, 1980; Welty et al., 2007).

Según Treybal (1980), está demostrado que la resistencia a la transferencia de masa en una operación de este tipo está gobernada por la fase líquida. La agitación mejora la transferencia debido a que promueve el contacto entre las fases líquida y gaseosa, al distribuir las burbujas por todo el tanque y evitar la coalescencia, lo que disminuiría el área de transferencia. Debido a las múltiples colisiones de las burbujas y a la misma agitación mecánica, resulta imposible medir el área de transferencia, por lo que se prefiere utilizar coeficientes volumétricos de transferencia de masa ($K_L a$). El parámetro “a” se define como el área disponible para la transferencia dividido entre el volumen total. Como no se puede calcular un flux N_A directamente, se calcula una tasa total de transferencia interfásica.

Si se realiza un balance de masa en la fase líquida para el oxígeno (soluto A) en un proceso batch, es decir, un proceso sin entradas ni salidas de líquido, resulta:

$$\frac{d(C_A \cdot V)}{dt} = K_L a \cdot V \cdot (C_A^* - C_A) \quad (1)$$

Donde

C_A : Concentración del soluto A, mol L⁻¹

C_A^* : Concentración en el equilibrio del soluto A, mol L⁻¹

V : Volumen total, m³

$K_L a$: Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, s⁻¹

t : Tiempo, s

En el balance se supone que no hay absorción de oxígeno por reacción química. Además, si el volumen total permanece constante

$$\frac{dC_A}{dt} = K_L a \cdot (C_A^* - C_A) \quad (2)$$

Integrando y sabiendo que

$$t = 0 \quad \Rightarrow \quad C_A = 0 \quad (3)$$

Se obtiene

$$C_A(t) = C_A^* \cdot (1 - e^{-K_L a \cdot t}) \quad (4)$$

Diversos son los métodos utilizados para calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Uno de los más comunes es la evacuación de gases, en la cual se reduce la concentración de oxígeno disuelto para luego comenzar a airear el líquido. Entonces, se lleva un continuo monitoreo de la concentración de oxígeno respecto al tiempo, datos que se grafican para obtener una curva creciente con pendiente cada vez menor, debido a que la velocidad de transferencia de oxígeno decrece con la reducción de la fuerza motriz ($C_A^* - C_A$). Uno de los métodos para evacuar el oxígeno de la fase líquida al inicio del experimento consiste en bombear nitrógeno hasta que el sensor de oxígeno disuelto otorgue una medición de cero. Hecho esto, se procede a airear el agua y graficar la concentración de oxígeno respecto al tiempo, obteniendo una curva que tiene la forma descrita por la Ecuación 4.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el sensor de oxígeno posee un retraso debido a la difusión del soluto a través de la membrana y finalmente dentro de la probeta para cambiar su concentración y obtener una medición. Este retraso en el cambio de concentración de oxígeno dentro de la probeta se puede describir de la forma

$$\frac{dC_p}{dt} = k_p \cdot (C_A^* - C_p) \quad (5)$$

C_p : Concentración del soluto en la probeta, mol L⁻¹

k_p : Constante de rezago del sensor, s⁻¹

De donde se obtiene

$$C_p = C_A^* \cdot (1 - e^{-k_p \cdot t}) \quad (6)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se tiene una forma de calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de masa tomando en cuenta el retraso del sensor, ecuación que tiene la forma

$$C_p = C_A^* \cdot \left(1 + \frac{K_L a}{k_p - K_L a} e^{-k_p \cdot t} - \frac{k_p}{k_p - K_L a} e^{-K_L a \cdot t} \right) \quad (7)$$

Correlaciones para el coeficiente de transferencia de masa

Se ha demostrado mediante análisis dimensional que el coeficiente volumétrico de transferencia de masa depende de la geometría del sistema, de las propiedades del fluido y de las condiciones de operación. La ecuación de Richards sugiere que para sistemas similares geoméricamente, el área interfacial de transferencia de masa por unidad de volumen se puede considerar un factor aparte del coeficiente de transferencia de masa.

Rushton sugiere tres grupos adimensionales de la siguiente forma:

$$\frac{K_L \cdot d_i}{D_{O_2}} = K_1 \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot d_i^2 \cdot N}{\mu_L} \right)^\delta \cdot \left(\frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_{O_2}} \right)^\beta \quad (8)$$

Donde

K_L : Coeficiente global de transferencia de masa, $m \cdot s^{-1}$

d_i : Diámetro del impulsor, m

D_{O_2} : Difusividad del oxígeno en el agua, $m^2 \cdot s^{-1}$

K_1 : Constante de proporcionalidad, adim

ρ_L : Densidad del líquido, $kg \cdot m^{-3}$

N : Velocidad de agitación, s^{-1}

μ_L : Viscosidad del líquido, Pa s

Si la difusividad permanece constante y las burbujas se pueden considerar esféricas, la ecuación anterior se simplifica a

$$K_L = K_2 \cdot N^{0.5} \quad (9)$$

Calderbank (1958) encontró que el coeficiente de transferencia de masa K_L es independiente de la potencia de agitación, y los efectos de esta sobre el coeficiente volumétrico de transferencia de masa $K_L a$ se deben a que la potencia, por el contrario, sí tiene efecto sobre el área interfacial de transferencia de masa a , por lo que presenta la ecuación

$$a = K_3 \cdot \left(\frac{P_G}{V_L}\right)^{0.4} \cdot \frac{\rho_L}{\sigma_L} \cdot \left(\frac{v_s}{v_t}\right)^{0.5} \quad (10)$$

Donde

V_L : Volumen del líquido libre del gas, m^3

P_G : Potencia suministrada considerando la presencia del gas, W

a : Área interfacial de transferencia de masa, m^{-1}

K_3 : Constante de proporcionalidad, adim

σ_L : Tensión superficial del líquido, $N m^{-1}$

v_s : Velocidad superficial del gas, $m s^{-1}$

v_t : Velocidad terminal de ascensión de las burbujas, $m s^{-1}$

De lo anterior, se obtiene la correlación propuesta por Richards

$$K_L a = K_4 \cdot \left(\frac{P_G}{V_L}\right)^{0.4} \cdot v_s^{0.5} \cdot N^{0.5} \quad (11)$$

En la literatura es común encontrar correlaciones con forma similar a la anterior. Sherwood (1975) presenta la suya de la forma

$$K_L a = K \cdot Q^{0.4} \cdot N^{1.76} \quad (12)$$

Donde

$K_L a$: Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, s^{-1}

Q : Flujo volumétrico de gas, $m^3 s^{-1}$

Nótese de lo anterior que el valor de potencia P_G requerido para las correlaciones, se refiere al valor de potencia considerando la presencia de gas en el sistema. Ya que comúnmente

no se cuenta con este dato, se puede calcular utilizando la potencia requerida en un sistema sin gas de la siguiente manera:

$$P_G = K_5 \cdot \left(\frac{P_0^2 \cdot N \cdot d_i^3}{Q^{0.45}} \right) \quad (13)$$

Donde

K_5 : Constante de proporcionalidad, adim

P_0 : Potencia requerida sin considerar la presencia de gas, W

Mientras que la potencia se puede calcular por el método

$$N_p = \frac{P_0}{N^3 \cdot d_i^5 \cdot \rho_L} = K_6 \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot d_i^2 \cdot N}{\mu_L} \right)^\theta \cdot \left(\frac{d_i \cdot N^2}{g} \right)^\lambda = f(Re, Fr) \quad (14)$$

Donde

K_6 : Constante de proporcionalidad, adim

N_p : Número de potencia, adim

g : Aceleración de la gravedad, m s⁻²

Re : Número de Reynolds, adim

Fr : Número de Froude, adim

Se debe tomar en cuenta que el número de Froude sólo es de importancia en el caso de la presencia de vórtices.

Investigación

- Investigue sobre el método de la oxidación de sulfito para la determinación del coeficiente de masa
- Investigue acerca del comportamiento de las burbujas en un tanque de burbujeo de acuerdo al flujo alimentado o nivel de agitación
- Factores que afectan el valor del coeficiente de transferencia de masa
- ¿Qué importancia tienen las mamparas en un experimento de este tipo?
- Tecnologías existentes para sensores de oxígeno disuelto según su aplicación

- Aplicaciones industriales de los tanques de burbujeo.

Recuerde que lo anterior es solo una guía y es lo mínimo que debería contener su investigación.

Procedimiento

Observe el equipo y familiarícese con él. Ubique las entradas de los distintos gases y cómo direccionarlos en el sistema de tuberías.

Preparación del equipo

1. Conecte el equipo a la línea de aire comprimido del laboratorio que cuente con una válvula de globo para la regulación del flujo.
2. Conecte el tanque de nitrógeno al equipo.
3. Llene el tanque con agua hasta que la membrana del sensor se encuentre en contacto con el agua.
4. Verifique que la pantalla, el sensor, el controlador del motor y la Raspberry pi se encuentran conectados a la regleta. Hecho esto, prenda la regleta.

Determinación de la constante de rezago del sensor

1. Llene 2 beakers con agua. En uno introduzca la manguera de nitrógeno y en el otro la de aire, burbujee simultáneamente en ambos beakers los gases correspondientes por medio de las válvulas 3 (nitrógeno) y 4 (aire). Mantenga las válvulas 1 y 2 cerradas.
2. Introduzca el sensor en el beaker en el cual está burbujeando nitrógeno y permita que la medición alcance el valor de 0 ppm.
3. Abra y ejecute el programa. Nómbralo adecuadamente para saber que se trata del experimento de la determinación de la constante del sensor. Note que el programa le pedirá el valor del flujo de aire y velocidad de agitación, sin embargo estas variables no aplican para dicha corrida; introduzca "N.A" o lo que prefiera. Deténgase cuando el programa le indique presionar "Enter" para iniciar.

4. Pase el sensor rápidamente al beaker en el cual está burbujeando aire y en ese instante inicie la recolección de datos. Detenga la recolección de datos cuando haya alcanzado el equilibrio y la medición no varíe.

Determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa

1. Fije una velocidad de agitación para la corrida.
2. Inicie el burbujeo de nitrógeno y manténgalo hasta obtener una medición de 0 ppm de oxígeno disuelto. Para esto mantenga cerradas las válvulas 2, 3 y 4, abra la válvula 1.
3. Introduzca los datos previos requeridos por el programa de recolección de datos y déjelo listo para iniciar.
4. Cierre la entrada de nitrógeno (V1) y permita la de aire (V2). Ajuste rápidamente el flujo por medio del rotámetro. Inicie la recolección de datos en el instante que se inicie el burbujeo de aire.
5. Detenga la recolección de datos una vez haya alcanzado el equilibrio.
6. Realice el experimento para 3 distintos flujos de aire variando la velocidad de agitación, luego para 3 distintas velocidades de agitación variando el flujo de aire.

Resultados

- Calcule el coeficiente de transferencia de masa para cada corrida, corregido y sin corregir por la constante de rezago del sensor. Calcule el error estándar.
- Compare gráficamente estos resultados.
- Encuentre la correlación del coeficiente de transferencia de masa corregido en función del flujo y la velocidad de agitación.

Discusión

Analice el comportamiento del coeficiente volumétrico de transferencia de masa respecto a las variables estudiadas.

Analice la correlación obtenida y la importancia de esta.

Bibliografía

Brown, W.A. (2001). Developing the best correlation for estimating the transfer of oxygen from air to Water. *Chem. Eng. Edu.* págs. 134-147.

McCabe, W. (2002). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mexico: McGraw-Hill

Perry y Green. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. New York: McGraw-Hill

Treybal , R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill

Anexos

Diagrama del equipo

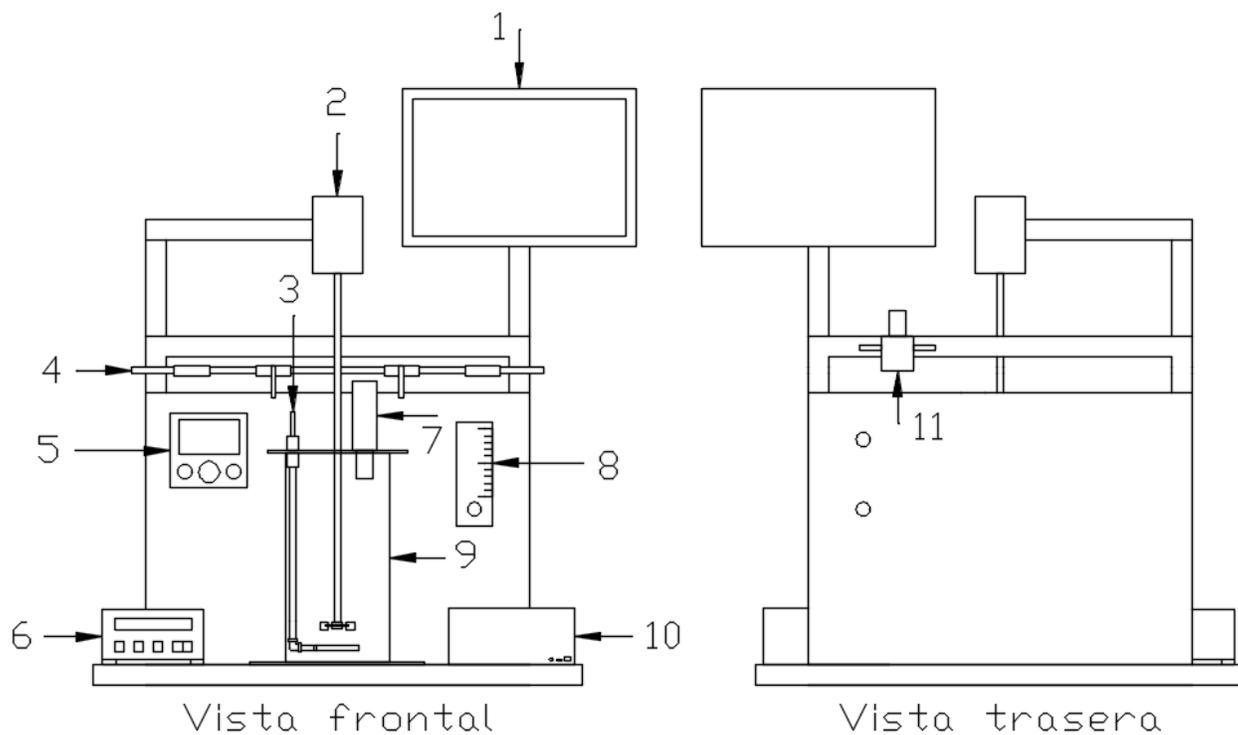


Figura 1. Diagrama del módulo de torre de pared húmeda.

Donde

- 1: Pantalla
- 2: Motor
- 3: Entrada de gas al tanque
- 4: Conexión de nitrógeno a la tubería
- 5: Pantalla del sensor
- 6: Controlador del motor
- 7: Sensor de oxígeno disuelto
- 8: Rotámetro
- 9: Tanque
- 10: Raspberry pi
- 11: Regulador de presión y entrada del aire

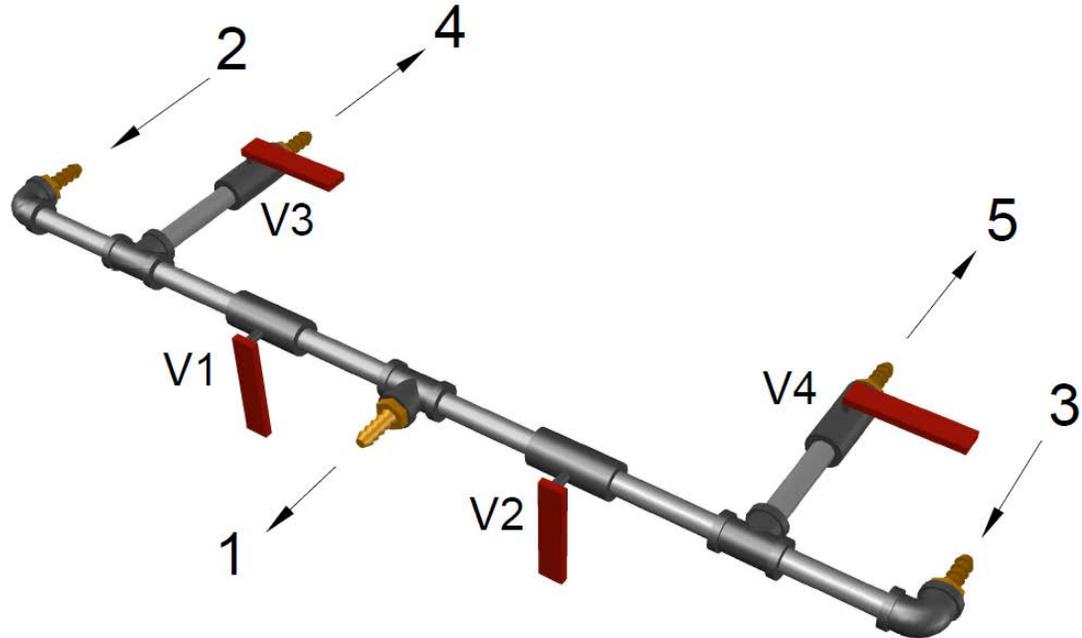


Figura 2. Detalle del sistema de tuberías del módulo de tanque agitado con aireación.

Donde

- 1: Salida de gas (nitrógeno/aire) hacia el tanque
- 2: Entrada de nitrógeno al equipo
- 3: Entrada de aire desde el rotámetro
- 4: Salida de nitrógeno para la determinación de la constante de rezago del sensor
- 5: Salida de aire para la determinación de la constante de rezago del sensor
- V1: Válvula 1 (Paso de nitrógeno hacia el tanque)
- V2: Válvula 2 (Paso de aire hacia el tanque)
- V3: Válvula 3 (Paso de nitrógeno hacia el beaker)
- V4: Válvula 4 (Paso de aire hacia el beaker)

Metodología de cálculo

Determinación del k_p

Identifique cuál es el valor de concentración de oxígeno disuelto en el equilibrio, es decir,

C_A^*

Realice una gráfica respecto al tiempo de

$$\ln\left(1 - \frac{C_A}{C_A^*}\right)$$

La pendiente de dicha gráfica corresponde al valor de $-k_p$

Determinación del $K_L a$

Ajuste los valores de concentración de oxígeno disuelto medido respecto al tiempo, a la ecuación

$$C_A = 1 - e^{-K_L a \cdot t}$$

en donde debe encontrar el valor de $K_L a$ que mejor ajuste. Para esto, puede usar el método de mínimos cuadrados y la herramienta *Solver* de Excel, o el software de su preferencia.

Determinación del $K_L a$ corregido por rezago del sensor

Ajuste los valores de concentración de oxígeno disuelto medido respecto al tiempo, a la ecuación

$$C_{p \text{ corr}} = C_A^* \cdot \left(1 + \frac{K_L a}{k_p - K_L a} e^{-k_p \cdot t} - \frac{k_p}{k_p - K_L a} e^{-K_L a \cdot t}\right)$$

en donde debe encontrar el valor de $K_L a$ que mejor ajuste, similar al punto anterior.

Correlación múltiple

Ajuste los valores obtenidos a la correlación de Sherwood y encuentre los valores de a, b y c por medio de alguno de los métodos o software matemáticos vistos en cursos anteriores.

Esta tiene la forma

$$K_L a = a \cdot Q^b \cdot N^c$$

Preste atención a sus unidades.

D.3. Guía de laboratorio para la práctica de torre de enfriamiento

Torres de enfriamiento

Objetivos

- Estudiar el funcionamiento de una torre de enfriamiento
- Determinar el coeficiente volumétrico de transferencia de masa
- Determinar una correlación para el coeficiente de transferencia de masa, dependiente del flujo de líquido

Introducción

Las torres de enfriamiento son equipos destinados a disminuir la temperatura de un líquido, generalmente agua, por medio del contacto con un gas no saturado con el vapor del líquido en cuestión; el gas más común es el aire. Se trata de columnas en las que en su interior poseen rellenos destinados a proveer un buen contacto gas-líquido con una muy baja caída de presión, la corriente de gas se obtiene por medio de ventiladores y a la salida de este se colocan rejillas inclinadas y eliminadores de arrastre con el fin de evitar que pequeñas gotas de líquido abandonen el equipo junto con la corriente gaseosa. En una industria, el agua de enfriamiento es un servicio más, tal como lo es el vapor, electricidad o el agua, y el uso más importante que se le da a este tipo de equipo corresponde a la reducción de la temperatura del agua que se recircula a intercambiadores de calor (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Según la posición del ventilador, las torres de enfriamiento se pueden clasificar en tres tipos:

- De tiro forzado: El ventilador se encuentra colocado en la entrada del gas e impulsa el gas a lo largo de la columna.
- De tiro inducido: El ventilador extractor se encuentra a la salida del gas e induce una corriente de entrada en el equipo.

- De flujo cruzado: El ventilador se encuentra en el lateral del equipo y la dirección de los flujos de gas y líquido son perpendiculares.

En una torre de enfriamiento, la disminución de la temperatura del líquido se da en su mayor parte por la evaporación de este, y en menor medida por la pérdida de calor sensible del líquido en caso de que el gas se encuentre a una menor temperatura. Sin embargo, aunque el gas se encuentre a una mayor temperatura que el líquido, aún es posible producir un enfriamiento, siempre y cuando la temperatura de bulbo húmedo del gas sea menor que la temperatura del líquido (McCabe et al., 2007).

Temperatura de bulbo húmedo

Cuando a una pequeña masa de líquido se le hace pasar un flujo constante de gas no saturado, parte del líquido se evapora y el calor latente proviene del enfriamiento de esta masa. Al encontrarse el líquido a una temperatura menor que el gas, comienza a existir un flujo de calor sensible hacia el líquido hasta el punto en que el calor necesario para la evaporación y calentamiento del vapor, es el mismo que el transferido desde el gas. La temperatura a la cual se alcanza este estado es conocida como temperatura de bulbo húmedo y corresponde a un estado estacionario dinámico, no a un estado de equilibrio. La fuerza impulsora para la transferencia de masa y energía, en este caso las diferencias de concentración y temperatura, son fácilmente predecibles con la temperatura de bulbo húmedo (McCabe et al., 2007).

Análisis de una torre de enfriamiento

Torre a contra corriente

Para el sistema agua-aire, conforme el agua recorre la torre disminuye su temperatura a lo largo de esta, así también la del aire aumenta. Para que exista enfriamiento del agua, en todo momento la temperatura del aire debe ser mayor que la temperatura de bulbo húmedo, en caso contrario la energía necesaria para la evaporación proviene enteramente del aire (McCabe et al., 2007). Si se hace un balance de energía para una pequeña sección

de la torre se tiene la Ecuación (1). En esta, el subíndice a representa el tope de la torre, mientras que b el fondo, x el agua y y el aire.

$$G'_y dH_y = d(G_x H_x) \quad (1)$$

Lo anterior haciendo la simplificación de que el flujo de líquido es constante, ya que las pérdidas por evaporación comprenden entre el 1% y el 2% (McCabe et al., 2007).

Donde

G'_y : Flujo másico de gas libre de vapor por unidad de área transversal, $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$

G'_x : Flujo másico de líquido por unidad de área transversal, $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$

H_y : Entalpía del gas, J

H_x : Entalpía del líquido, J

$$G'_y dH_y = G_x \cdot C_{pL} \cdot dT_x \quad (2)$$

Donde

T: Temperatura, °C

C_{pL} : Capacidad calorífica del líquido, $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$

Lo anterior tomando en cuenta que la variación en la entalpía del gas es el resultado de dos factores, la variación en el calor sensible, así como la variación de la humedad multiplicada por el calor de vaporización

$$dH_y = C_s \cdot dT_y + \lambda_0 \cdot dY \quad (3)$$

Donde

λ : Calor latente de vaporización, J kg^{-1}

Y: Humedad absoluta, $\text{kg agua} / \text{kg aire seco}$

Entonces, el balance global para la torre resulta de la manera

$$G'_y(H_a - H_b) = G_x \cdot C_{pL} \cdot (T_{xa} - T_{xb}) \quad (4)$$

Mientras que para cualquier punto intermedio es

$$G'_y(H_a - H_b) = G_x \cdot C_{pL} \cdot (T_{xa} - T_x) \quad (5)$$

Lo que proporciona una curva de operación para la torre en forma de la entalpía del gas contra la temperatura del líquido. Adicionalmente una curva de equilibrio es proporcionada mediante la ecuación de la entalpía del gas saturado con agua respecto a la temperatura

$$H_{y\text{ sat}} = C_s \cdot (T_y - T_0) + \lambda_0 \cdot Y_{\text{sat}} \quad (6)$$

Se puede realizar un diagrama de líneas de operación-equilibrio para averiguar la altura total de una torre mediante

$$\frac{H_i - H_y}{T_i - T_x} = \frac{-h_x a}{k_y a \cdot M_b} \quad (7)$$

Ya que los puntos (Hi, Ti) y (Hy, Tx) están unidos mediante rectas de pendientes $\frac{-h_x a}{k_y a \cdot M_b}$ por lo que la integración de estos puntos permitiría averiguar la altura total de relleno mediante la fórmula

$$\int \frac{dH_y}{H_i - H_y} = \frac{k_y a \cdot M_b \cdot Z_T}{G'_y} \quad (8)$$

Sin embargo, por simplicidad se prefiere trabajar con un coeficiente global y con una fuerza impulsora de entalpía global

$$G'_y dH_y = K_y a \cdot (H_y^* - H_y) \cdot dZ \quad (9)$$

Con

$$\int \frac{dH_y}{H_y^* - H_y} = N_{Oy} = \frac{Z_T}{H_{Oy}} \quad (10)$$

Siendo

$$H_{Oy} = \frac{G'_y}{K_y a} \quad (11)$$

Donde

H_{Oy} : Altura de una unidad de transferencia, m

N_{Oy} : Número de unidades de transferencia, adim

Z_T : Altura total de relleno, m

$K_y a$: Coeficiente global de transferencia de masa en la fase gaseosa,

M_b : Masa molar del aire, kmol kg^{-1}

Torre de flujo cruzado

Las torres de flujo cruzado presentan consideraciones distintas que las de flujo a contra corriente. Un método de diseño que consiste en realizar el balance de energía a través de un elemento diferencial del volumen de la torre, obteniendo una ecuación diferencial, por lo que se requiere conocer las condiciones de frontera, temperatura de entrada y salida del líquido y del aire.

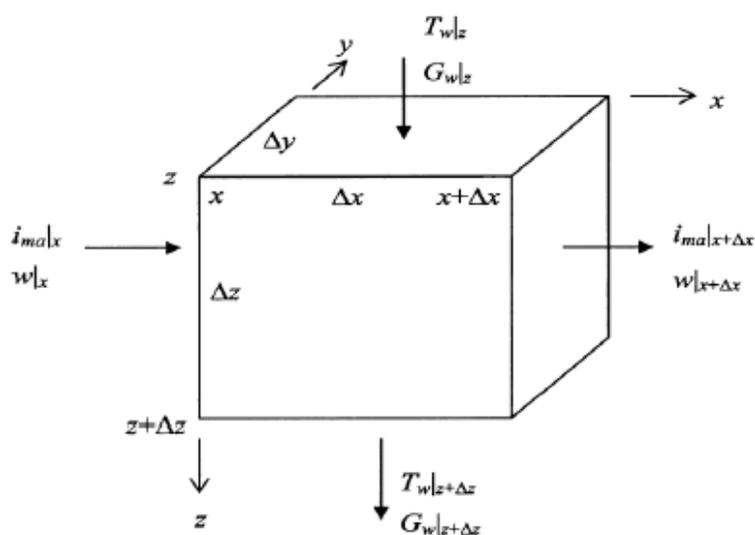


Figura 76. Volumen de control diferencial para una torre de flujo cruzado.

Al resolver la ecuación diferencial tomando en cuenta las suposiciones y condiciones de contorno, se llega a un conjunto de ecuaciones que permiten encontrar el coeficiente de transferencia de masa para el gas, ya que la resistencia a la transferencia de masa se da principalmente en la fase gaseosa. Dicha ecuación de diseño es

$$z = -\frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1}{\gamma} \left[\exp \left(\frac{t_{Le} - t_{Lpromedio(z)}}{40} \right) - \varepsilon \right] \right\} \quad (12)$$

Para obtener dicha ecuación, se sigue el siguiente método

La masa ganada por el gas corresponde a

$$G_m \frac{\partial C_G}{\partial x} dx dy dz \quad (13)$$

Donde G_m es el flujo molar de gas, lb mol/hr ft² y C_G es la fracción mol del soluto en el gas.

El balance de masa perdida para el gas es

$$-L_m \frac{\partial C_L}{\partial z} dx dy dz \quad (14)$$

Por lo que el intercambio de masa es

$$K_G a (C^* - C_G) dx dy dz \quad (15)$$

Donde C^* es la fracción molar del soluto en equilibrio con el líquido. Utilizando la Ley de Henry y las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$-L_m \frac{\partial C_L}{\partial z} = K_G a (m C_L - C_G) = G_m \frac{\partial C_G}{\partial x} \quad (16)$$

Con las condiciones de contorno

$$C_L = C_{0L} \quad \text{en } z = 0 \quad \text{para todo } x$$

$$C_G = C_{0G} = 0 \quad \text{en } x = 0 \quad \text{para todo } z$$

El efecto de la temperatura se debe tomar en cuenta para usar la Ley de Henry, esto se hace usando la Ecuación (17):

$$m = 0.1 \exp(0.0284 t) \quad (17)$$

Donde la temperatura debe estar entre $32^\circ\text{F} < t < 140^\circ\text{F}$.

Zivi Y Brand (1956) derivan la ecuación que gobierna el balance de masa en la torre de flujo cruzado como

$$-L C_{pL} \frac{\partial t_L}{\partial z} = G \frac{\partial i}{\partial x} \quad (18)$$

Donde L y G son las velocidades del líquido y el gas respectivamente, i es la entalpia del aire en Btu/lb, C_{pL} calor específico del líquido, Btu/lb°F. Se tiene entonces:

$$G \frac{\partial i}{\partial x} = Ka(i^* - i) \quad (19)$$

Donde Ka= coeficiente de transferencia de coeficiente, lb/h ft², i^* es la entalpia del aire en equilibrio con el agua:

$$i^* = \exp(1.77 + 0.025 t_L) \quad (20)$$

Para $40^\circ\text{F} \leq t_L \leq 130^\circ\text{F}$, se toman en cuenta las siguientes condiciones de frontera

$$t_L = t_{0L} \quad \text{en } z = 0$$

$$i = i_0 \quad \text{en } x = 0$$

Estas ecuaciones se basan en suposiciones de estado estacionario, además, en que las tasas de flujo, capacidad calorífica y humedad son independientes de la posición y que la relación de Lewis es válida, el coeficiente global es constante y el proceso de difusión es despreciable con respecto al convectivo. Se resuelve la Ecuación 22 y se simplifica (el procedimiento completo se describe Wnek (1972)) obteniéndose:

$$\frac{n_0 \ln\left(\frac{C_{0L}}{C_{L \text{ promedio}}}\right)}{1 - \exp(-n_0)} = [\gamma \exp(-\varphi\xi) + \varepsilon]^{-0.14} \left\{ \frac{\xi}{\varepsilon} - \frac{1}{\varphi\varepsilon} \ln[\gamma \exp(-\varphi\xi) + \varepsilon] \right\} \quad (21)$$

Donde

$$n_0 = \frac{K_G a}{G_m} x_0$$

$$\gamma = (I_e - 1)/I_e$$

$$I_e = i_e/I_0^*$$

$$I_0^* = \exp(1.77 + 0.025 t_{Le})$$

$$\varepsilon = 1/i_e$$

$$\varphi = aL_m/K_G aH$$

$$H = 0.1 \exp(0.0284 t_{Le})$$

$$\alpha = \beta I_e (1 - \exp(-X_0/X_0))$$

$$\beta = 0.025 K a I_0^* / C_{pL} L$$

$$X_0 = K a x_0 / G$$

$$\xi = \frac{K_G a H}{L_m} z$$

L , concentración del líquido entrante es C_{0L} ; la concentración promedio del líquido de salida es $C_{L \text{ promedio}}$, i_e es la entalpia del aire de entrada. Para el tipo de torre de flujo cruzado mostrado en la Figura 9.2 y 9.3, se tiene:

$$y_0 = \frac{L_T}{2 x_0 L} \quad (22)$$

Donde L_T es el flujo de líquido, lb/h.

La temperatura promedio del líquido de salida es

$$t_{L \text{ promedio}}(z) = t_{Le} - 40 \ln[\gamma \exp(-\alpha z) + \varepsilon] \quad (23)$$

Resolviendo la ecuación para z se obtiene la ecuación de diseño de la torre de flujo cruzado (Wnek, 1972)

Se debe tomar en cuenta que no existe un único método para el diseño de torres de enfriamiento de flujo cruzado. En el artículo de Kloppers y Koger (2004), se estudia con detalle la derivación de las ecuaciones que describen el proceso de enfriamiento por evaporación; el procedimiento sugerido por dichos autores se muestra como anexo.

Investigación

- Características, ventajas y desventajas de los diferentes tipos de torres de enfriamiento y sus usos más comunes.
- Modelos, modificaciones y suposiciones utilizados para el análisis de transferencia de masa en cada tipo de torre.
- Ventajas del uso de una torre de enfriamiento en comparación con otros tipos de procesos que tienen la misma finalidad.
- Investigue sobre los tratamientos para el agua de torres de enfriamiento.
- Materiales de construcción.
- Método de selección del tipo de torre de enfriamiento a utilizar.
- Correlaciones existentes sobre la potencia de abanico requerida para el uso de estos equipos.
- Rellenos y fabricantes

- Aplicaciones industriales.

Procedimiento

Familiarícese con los equipos y comprenda cómo operarlos antes del día de la práctica.

Para cada torre:

1. Inicie el calentamiento del agua. No permita que la temperatura aumente más de 50°C.
2. Fije un flujo de agua y uno de aire (en el caso de la torre de tiro inducido). Deje que el sistema llegue al estado estacionario.
3. Mida las temperaturas de ambos fluidos tanto a la entrada como a la salida, al igual que las humedades relativas del aire a la entrada y a la salida. No olvide medir los flujos: el de agua haciendo la lectura en el rotámetro y el de aire mediante mediciones de velocidad con el termo anemómetro y el diámetro del ducto de salida.
4. Repita para otros cuatro flujos de agua, asegurándose que las demás variables permanezcan constantes.

Resultados

Para cada torre:

1. Calcule el coeficiente de transferencia de masa para cada corrida.
2. Encuentre la correlación para el coeficiente de transferencia de masa.
3. Estime el error estándar para cada correlación y los residuos.

Discusión

1. Discuta sobre el comportamiento de las líneas de operación para cada corrida, según la condición que haya variado.
2. Comente sobre la importancia o aplicación de dicha correlación y compárela con otras reportadas en la literatura.
3. Analice el error estándar y los residuos para la validación del modelo obtenido.
4. Analice las variaciones en los modelos para la transferencia de masa con respecto a otros equipos de enfriamiento.

Bibliografía

- Burguer, R. Cooling Towers the often over-looked. Chemical Engineering. Mayo (1993)
- Kloppers, J; Koger, D., "Acritical Investigation into the Heat and Mass Transfer Analysis of Cross-Flow wet Cooling Towers", Numerical Heat Transfer; Tayloy & Francis Inc., 2004
- Mapstone, G. Control Cooling Tower Blowdown. Chemical Engineering. (1953)
- McCabe, W. Operaciones Básicas en Ingeniería Química. 4ª edición. Editorial McGraw-Hill, México D.F. (1995); pp. 769-772.
- Ocon, J. Vian, A. Elementos de Ingeniería Química. 5ta Edición. Editorial Aguilar S.A. España (1976); pp. 464-470.
- Perry, R; Green, D. Manual del Ingeniero Químico. 7a edición. Editorial Mc Graw Hill. España (1997); pp. 12-16 a 12-25.
- Sherwood, T; Pigford, R; Wilke, C. Mass Transfer. 3era edición. Editorial Mc Graw Hill. USA (1975); pp. 286-291.
- Treybal, R. Operaciones de Transferencia de Masa, Editorial McGraW-Hill, Segunda Edición, México (1988); pp.247-270, 289-294.
- Van Wylen, G. Fundamentos de Termodinámica. 2ª edición, Editorial LIMUSA, México (2000); pp. 542-544, 870.
- Wnek, W. et al, "Design of cross-flow cooling towers and ammonia stripping towers", Ind. Eng. Chem.. Volume 11, Number 3 (1972).

Apéndice E: Manuales de equipo

E.1. Manual de equipo para la torre de pared húmeda

Torre de pared húmeda

Manual de equipo

Diagrama de equipo

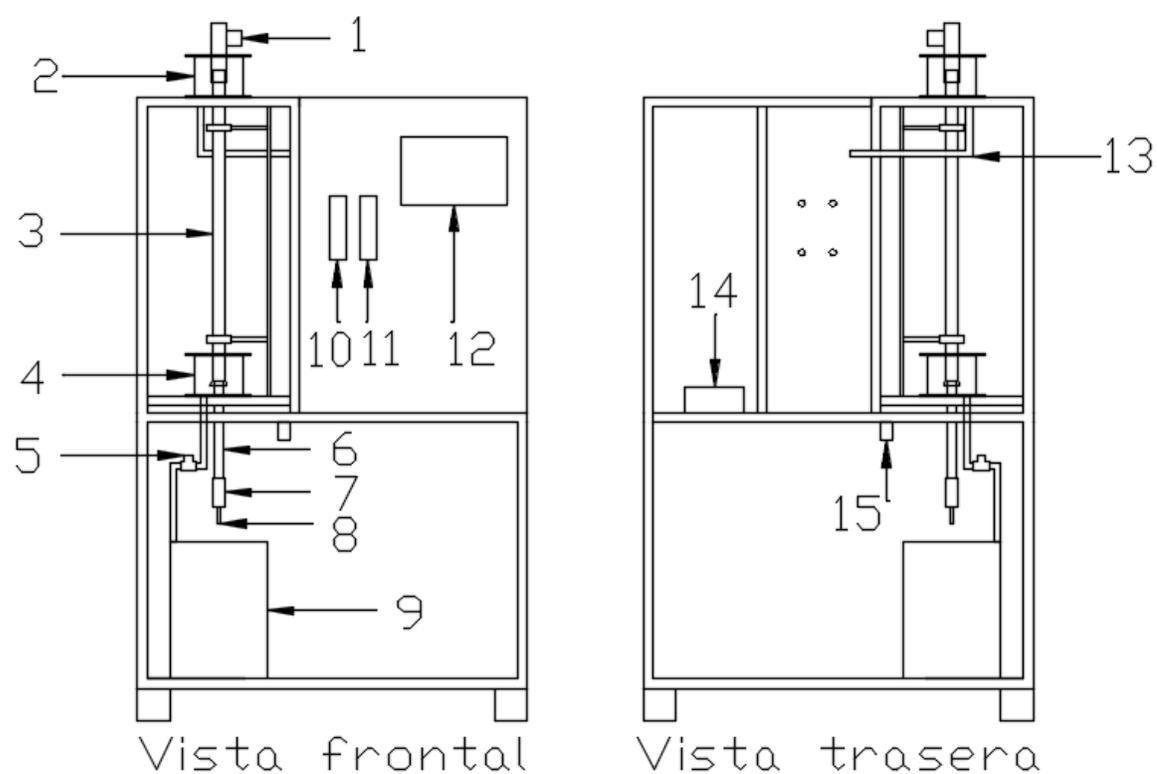


Figura 1. Diagrama del módulo de torre de pared húmeda.

Donde

1: Sensor de humedad relativa de salida

2: Depósito de agua superior

- 3: Columna principal
- 4: Depósito de agua inferior
- 5: Sensor de temperatura del agua de salida
- 6: Columna secundaria inferior
- 7: Sensor de humedad relativa de entrada
- 8: Válvula de purga
- 9: Tanque de agua y bomba sumergible
- 10: Rotámetro de agua
- 11: Rotámetro de aire
- 12: Pantalla
- 13: Sensor de temperatura del agua de entrada
- 14: Raspberry Pi
- 15: Regulador de presión del aire

Modo de operación

Arranque

Para su operación, el equipo requiere agua, además de una conexión a la red de aire comprimido y a la corriente eléctrica.

- Agua: Verifique que el tanque se encuentre limpio y sin partículas que puedan ser succionadas por la bomba y puedan obstruir el rotámetro. Llene el tanque de agua. Para esto utilice agua destilada o una manguera conectada a la tubería del laboratorio. Llene el reservorio al menos hasta un tercio de su capacidad, para lo que se requieren alrededor de 16 litros de agua. Haga el arranque con el rotámetro de agua completamente abierto.
- Aire: Verifique que el compresor de aire se encuentra encendido, consulte con los encargados del laboratorio. Conecte el equipo a la línea de aire comprimido del laboratorio. Utilice una manguera para aire comprimido con acoples de conexión rápida tipo hembra en sus extremos. Para conectar la manguera, utilice el extremo de tubería del laboratorio que cuenta con una válvula de globo para la regulación del flujo de aire, conecte el otro extremo al regulador de presión de aire ubicado en

el marco del equipo. Verifique que el rotámetro de aire se encuentra completamente cerrado. Abra la válvula de globo para permitir la entrada de aire, solo una pequeña parte de su apertura es suficiente. Ajuste la presión del aire de entrada mediante el regulador de presión, no es necesaria una presión mayor a 20 psi. Abra el rotámetro de aire lentamente y verifique que puede utilizar todo el rango de este, si no es así, abra la válvula de globo hasta donde sea necesario.

- Componentes eléctricos: Verifique que todos los sensores se encuentran conectados a la Raspberry Pi, estos son 4. Los sensores de temperatura del agua, uno a la entrada y otro a la salida; y los sensores de humedad relativa del aire, también uno a la entrada y otro a la salida. Las conexiones de los sensores de temperatura poseen 3 pines y se diferencian de las de los sensores de humedad relativa en que estas últimas poseen 4 pines. Para hacer las conexiones se deben hacer coincidir los colores de los cables, además, se debe hacer coincidir la forma del conector del cable, por lo que esta tarea es sencilla e intuitiva. Además, cada cable se encuentra debidamente rotulado.

Conecte además a la Raspberry Pi la pantalla y el cable de la corriente eléctrica.

Verifique que la regleta se encuentre apagada. Conecte en ella la pantalla, la bomba y la Raspberry Pi. Encienda la regleta cuando se encuentre todo listo para empezar su experimento. Considere que una vez encendida la Raspberry Pi, se debe tener el cuidado de apagarla correctamente, es decir, no la desconecte de la regleta ni apague esta súbitamente, ya que esto puede dañar la tarjeta de memoria.

Por otra parte, no desconecte la bomba si no es necesario. Si debe hacerlo, es posible que al volver a conectarla note como esta no es capaz de entregar el mismo flujo de antes. Si esto ocurre, con la bomba apagada permita que el equipo drene por completo el depósito de agua superior y las tuberías de agua que llevan a este. Una vez haya drenado por completo, vuelva a conectarla con el rotámetro abierto al máximo y verá cómo nuevamente esta entregará el flujo deseado.

Procedimiento de uso

1. Verifique que todo el equipo eléctrico se encuentra conectado de acuerdo a la sección “Arranque”.
2. Decida los valores de flujo de agua y aire que utilizará en su corrida. Abra el programa de adquisición de datos, introduzca los datos previos y déjelo listo para iniciar.
3. Con el rotámetro de agua inicialmente completamente abierto, conecte la bomba y regule el flujo de agua hasta el valor deseado. Asegúrese que la válvula de purga de la torre secundaria inferior se encuentra abierta.
4. Con el rotámetro de aire inicialmente completamente cerrado, regule el flujo de aire hasta alcanzar el valor deseado.
5. Inicie la recolección de datos cuando lo desee. Una vez haya alcanzado el estado estacionario, presione “Detener” una primera vez para parar la recolección de datos, y una segunda vez para cerrar las gráficas.

Procedimiento de uso del programa de adquisición de datos

1. Verifique que el cable de comunicación entre los sensores y la Raspberry pi se encuentran conectados.
2. Conecte la Raspberry pi a la corriente eléctrica. Hecho esto no la vuelva a desconectar súbitamente ni apague la regleta a la que pudiera estar conectada. Si desea apagarla, hágalo correctamente por medio de la opción de apagado de la Raspberry pi; es decir: Botón de inicio>Shutdown.
3. Abra el programa de adquisición de datos, este se encontrará en el escritorio. El uso de este programa se limita a las opciones de “Ejecutar” y “Detener”. No modifique el código a menos que sea estrictamente necesario y sepa lo que está realizando.

4. Ejecute el programa cuando se encuentre listo para iniciar.
 - Este primero le solicitará que nombre su experimento, este será el nombre con el que se guardará la hoja de cálculo al detener la adquisición de datos, procure utilizar un nombre que posteriormente le facilite identificar el experimento que llevó a cabo.
 - Luego, el programa le pedirá el flujo de aire y de agua que utilizará en el experimento; introduzca estos datos.
 - Una vez introducidos estos datos, el programa le pedirá que presione “Enter” para iniciar el experimento; la recolección de datos iniciará en el instante en que presione “Enter”.
5. El programa empezará a registrar aproximadamente una muestra cada 5 segundos, adicionalmente le mostrará en pantalla dos gráficas. Una de ellas corresponde a las cuatro mediciones temperatura en los distintos puntos, y la otra las dos mediciones de humedad relativa. Utilice estas gráficas para observar el alcance del estado estacionario.
6. Cuando quiera detener la ejecución del programa, simplemente presione la opción de “Detener” y una segunda vez para cerrar las gráficas. La hoja de cálculo con los datos se guardará en la carpeta “Home”, esta es fácilmente accesible desde la parte superior del escritorio.
7. Recuerde extraer sus hojas de cálculo en un dispositivo USB al finalizar la práctica. Por favor, borre estos documentos de la Raspberry Pi una vez los haya guardado en su dispositivo, con el fin de evitar la acumulación de archivos en esta carpeta.

Mantenimiento

- Tanque de agua: Siempre limpie el tanque de agua antes de llenarlo de agua, verifique que no hay en su interior partículas que puedan ser succionadas por la bomba y puedan obstruir las tuberías, especialmente el rotámetro. Elimine el agua

del tanque al final de cada bloque de prácticas, para esto utilice la válvula de purga o una bomba sumergible.

- Columna principal: De ser posible, opere el equipo con agua destilada para evitar incrustaciones en la columna principal que puedan dificultar la obtención de una película. Si no es así, enjuague esta al finalizar cada bloque de prácticas. Para esto, quite la tapa del depósito de agua superior y con un beaker haga correr agua destilada por el interior de la columna. Asegúrese que la válvula de purga de la columna secundaria inferior se encuentre abierta para expulsar inmediatamente el agua que pueda caer en esta, con el fin de proteger el sensor de humedad relativa. Si está teniendo dificultad para que el agua moje uniformemente todo el interior de la columna, es posible que esta se encuentre sucia. Para lavarla, quite la tapa del depósito superior y lave toda la longitud interna de esta, utilizando un hisopo y jabón para lavar platos. Utilice jabón líquido, ya que el jabón sólido puede dejar un sedimento en el fondo de ambos depósitos de agua.
- Depósitos de agua: Enjuague también con agua destilada los depósitos superior e inferior para evitar incrustaciones que disminuyan la transparencia de estos. Para esto, enjuague con un beaker el interior del depósito de agua superior. El depósito inferior se enjuagará automáticamente al realizar el lavado de la columna principal.
- Rotámetro de agua: Si el agua del tanque se encuentra sucia, es posible que la bomba pueda succionar partículas que obstruyan el rotámetro. Si está teniendo problemas para obtener un flujo mayor a $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ se recomienda realizar una limpieza de este. Para esto permita que el equipo drene por completo, luego desconecte las mangueras que se conectan al rotámetro. Quite los tornillos que mantienen al rotámetro fijo al equipo y retírelo. El punto más propenso a obstruirse es el orificio en la válvula que regula el flujo, para limpiarla afloje la tuerca trasera del rotámetro mientras simultáneamente abre la válvula. Tome en cuenta que se deben realizar estas dos acciones simultáneamente, ya que si sólo gira la tuerca,

aflojará el émbolo pero no tendrá acceso al orificio obstruido. Si abre la válvula podrá retirar el émbolo por completo.

E.2. Manual de equipo para el tanque agitado con aireación

Torre de pared húmeda

Manual de equipo

Diagrama de equipo

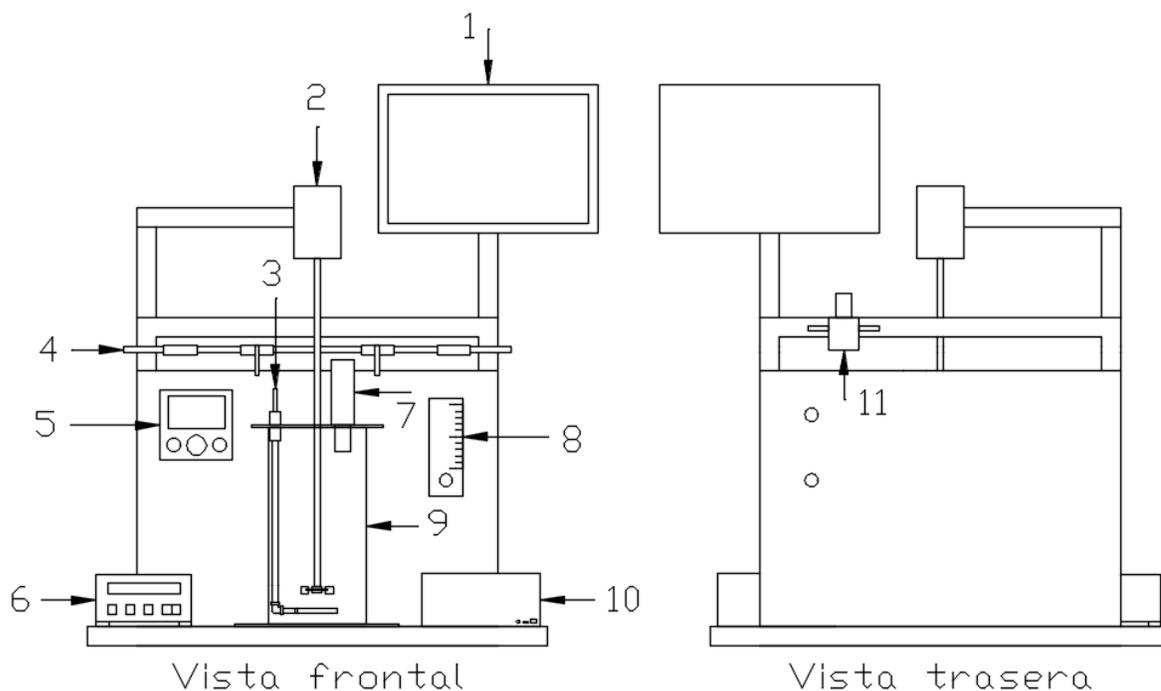


Figura 1. Diagrama del módulo de torre de pared húmeda.

Donde

- 1: Pantalla
- 2: Motor
- 3: Entrada de gas al tanque
- 4: Conexión de nitrógeno a la tubería
- 5: Pantalla del sensor

- 6: Controlador del motor
- 7: Sensor de oxígeno disuelto
- 8: Rotámetro
- 9: Tanque
- 10: Raspberry pi
- 11: Regulador de presión y entrada del aire

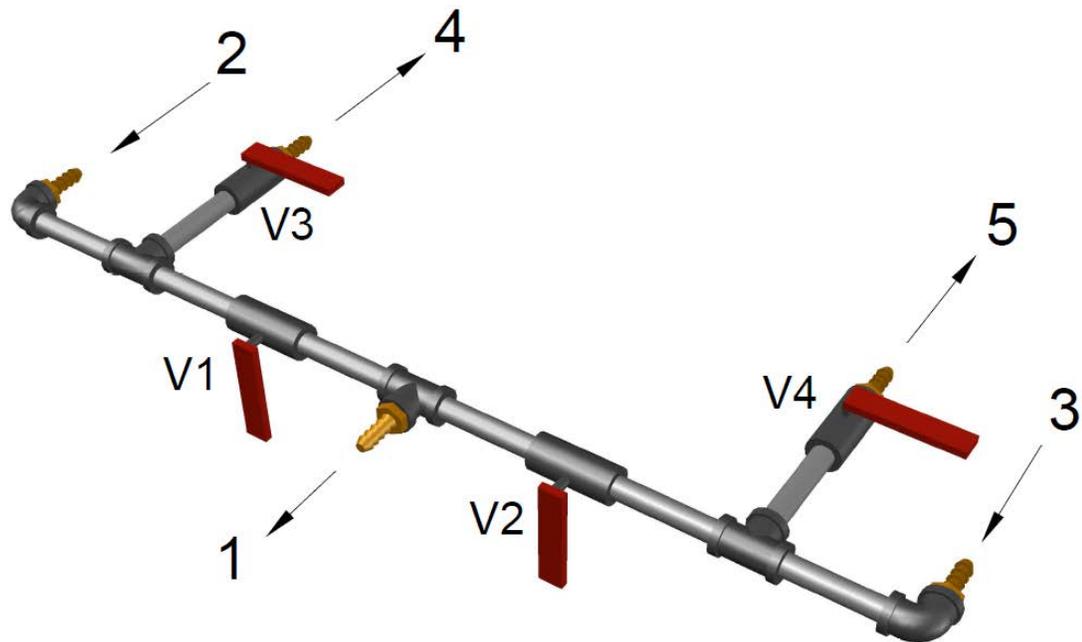


Figura 2. Detalle del sistema de tuberías del módulo de tanque agitado con aireación.

Donde

- 1: Salida de gas (nitrógeno/aire) hacia el tanque
- 2: Entrada de nitrógeno al equipo
- 3: Entrada de aire desde el rotámetro
- 4: Salida de nitrógeno para la determinación de la constante de rezago del sensor
- 5: Salida de aire para la determinación de la constante de rezago del sensor
- V1: Válvula 1 (Paso de nitrógeno hacia el tanque)
- V2: Válvula 2 (Paso de aire hacia el tanque)
- V3: Válvula 3 (Paso de nitrógeno hacia el beaker)
- V4: Válvula 4 (Paso de aire hacia el beaker)

Modo de operación

Arranque

Para su funcionamiento, el equipo debe contar con conexión a un tanque de nitrógeno, a la red de aire comprimido y a la corriente eléctrica.

- Aire: Verifique que el compresor de aire se encuentra encendido, consulte con los encargados del laboratorio. Verifique que el rotámetro de aire, así como todas las válvulas del equipo se encuentran completamente cerradas. Conecte el equipo a la línea de aire comprimido del laboratorio. Utilice una manguera para aire comprimido con acoples de conexión rápida tipo hembra en sus extremos. Para conectar la manguera, utilice el extremo de tubería del laboratorio que cuenta con una válvula de globo para la regulación del flujo de aire, conecte el otro extremo al regulador de presión de aire ubicado en la parte trasera del marco del equipo. Abra la válvula de globo para permitir la entrada de aire, solo una mínima parte de su apertura es suficiente. Ajuste la presión del aire de entrada mediante el regulador de presión, no es necesaria una presión mayor a 20 psi.
- Conexiones eléctricas: Verifique que la regleta se encuentra apagada y conecte en ella el controlador del motor, la pantalla, el sensor de oxígeno disuelto y la Raspberry pi. Verifique además que el cable de comunicación entre el sensor de oxígeno disuelto y la Raspberry pi se encuentra conectado. Hecho esto, puede conectar y prender la regleta. Considere que una vez encendida la Raspberry Pi, se debe tener el cuidado de apagarla correctamente, es decir, no lo desconecte de la regleta ni apague esta súbitamente, ya que esto puede dañar la tarjeta de memoria.
- Nitrógeno: Utilice en el tanque de nitrógeno, una válvula que cuente con manguera que posea un acople hembra de conexión rápida.
- Preparación del tanque de agua: Llene el tanque con agua hasta que la membrana del sensor se encuentre en contacto con esta. Seleccione qué burbujeador utilizará y coloque la tapa correspondiente sobre el tanque. Introduzca el eje del motor por

el agujero central de la tapa y coloque el agitador, luego coloque el empaque y fije la tapa con tornillos. Conecte el tanque a la tubería de aire utilizando la manguera con acople rápido.

Procedimiento de uso

7. Fije una velocidad de agitación para la corrida.
8. Inicie el burbujeo de nitrógeno y manténgalo hasta obtener una medición de 0 ppm de oxígeno disuelto.
9. Introduzca los datos previos requeridos por el programa de recolección de datos y déjelo listo para iniciar.
10. Una vez haya obtenido la medición de 0 ppm, cierre la entrada de nitrógeno y permita la de aire. Ajuste rápidamente el flujo por medio del rotámetro. Inicie la recolección de datos en el instante que se inicie el burbujeo de aire.
11. Detenga la recolección de datos una vez haya alcanzado el equilibrio.

Procedimiento de uso del programa de adquisición de datos

6. Verifique que el cable de comunicación entre el sensor y la Raspberry pi se encuentra conectado.
7. Conecte la Raspberry pi a la corriente eléctrica. Hecho esto no la vuelva a desconectar súbitamente ni apague la regleta a la que pudiera estar conectada. Si desea apagarla, hágalo correctamente por medio de la opción de apagado de la Raspberry pi; es decir: Botón de inicio>Shutdown.
8. Abra el programa de adquisición de datos, este se encontrará en el escritorio. El uso de este programa se limita a las opciones de “Ejecutar” y “Detener”. No modifique el código a menos que sea estrictamente necesario y sepa lo que está realizando.
9. Ejecute el programa cuando se encuentre listo para iniciar.

- Este primero le solicitará que nombre su experimento, este será el nombre con el que se guardará la hoja de cálculo al detener la adquisición de datos, procure utilizar un nombre que posteriormente le facilite identificar el experimento que llevó a cabo.
 - Luego, el programa le pedirá el flujo de aire y la velocidad de agitación que utilizará en el experimento; introduzca estos datos. Si se encuentra realizando el experimento de determinación de la constante de rezago del sensor, donde no aplica un valor de flujo o de agitación, introduzca "N.A" o lo que prefiera.
 - Una vez introducidos estos datos, el programa le pedirá que presione "Enter" para iniciar el experimento; la recolección de datos iniciará en el instante en que presione "Enter".
10. El programa empezará a registrar aproximadamente una muestra por segundo. Adicionalmente le mostrará en pantalla una gráfica del valor de oxígeno disuelto contra el tiempo, utilícela para observar el alcance del estado estacionario.
 11. Cuando quiera detener la ejecución del programa, simplemente presione la opción de "Detener". La hoja de cálculo con los datos se guardará en la carpeta "Home", esta es fácilmente accesible desde la parte superior del escritorio.
 12. Recuerde extraer sus hojas de cálculo en un dispositivo USB al finalizar la práctica. Por favor, borre estos documentos de la Raspberry Pi una vez los haya guardado en su dispositivo, con el fin de evitar la acumulación de archivos en esta carpeta.

Calibración del programa de adquisición de datos.

Esto debe ser llevado a cabo si los valores mostrados en la pantalla del sensor difieren inaceptablemente del valor graficado y registrado por la Raspberri pi. (Nota: Esto no se refiere a una calibración del sensor, para ello, refiérase al manual del fabricante de dicho equipo)

El sensor de oxígeno disuelto y la Raspberry pi son dos equipos completamente independientes. Para comunicarse entre sí, el sensor envía una señal analógica de corriente en el rango de 4 – 20 mA. Ya que la Raspberry pi no cuenta con una entrada de señales analógicas, esta se convierte primero a tensión por medio de una resistencia de 220 Ω , y luego a una señal digital utilizando un conversor analógico digital ADS1115. Ya que la Raspberry lo que recibe es una señal en forma de tensión, esta debe ser convertida a un valor de oxígeno disuelto por medio de una ecuación de calibración dentro del código.

La principal razón por la que este valor podría descalibrarse, es si por alguna razón se debiera cambiar la resistencia que convierte la señal del sensor de corriente a tensión, ya que los valores de corriente enviados por el sensor son fijos, pero si se cambia el valor de la resistencia, se cambiarán los valores de tensión que recibe la Raspberry pi. Sin embargo, si por cualquier razón se llegara a notar que los valores presentados en la pantalla del sensor difieren en una magnitud inaceptable de los valores graficados por la Raspberry pi (y por ende, los registrados en la hoja de cálculo) realice una calibración del programa de adquisición de datos siguiendo el procedimiento que se presenta.

Procedimiento de calibración del programa de adquisición de datos

1. Utilice un recipiente con agua. Puede utilizar el tanque, sin embargo, se recomienda un beaker plástico o cualquier recipiente pequeño, esto con el fin de requerir menor cantidad de nitrógeno y de reducir el tiempo necesario para saturar el agua.
2. Abra el programa de calibración, el cual encontrará en el escritorio. Este programa es similar al utilizado para la recolección de datos del experimento, sin embargo, este lo que registrará en la hoja de cálculo será el valor digital medido, así como el valor de tensión.
3. Introduzca el sensor de oxígeno disuelto en el recipiente y burbujee nitrógeno en él hasta que la pantalla del sensor indique una medición estable de 0 ppm.
4. Una vez alcanzado este valor, inicie la recolección de datos y manténgala operando por al menos 30 segundos. Esta será su primera corrida.

5. Detenga el burbujeo de nitrógeno y comience a burbujear aire hasta saturar el agua. Asegúrese de que el valor presentado en la pantalla del sensor no varía más de una vez cada 30 segundos.
6. Inicie la recolección de datos y permita su ejecución al menos por 30 segundos. Esta será su segunda corrida. **IMPORTANTE:** Anote el valor de oxígeno disuelto presentado en la pantalla del sensor durante estos 30 segundos.
7. Para los cálculos, promedie los valores de la columna “Valor digital” de su primera corrida. Este será su valor “x1”, sabiendo que el valor de “y1” es 0 ppm. Luego para su segunda corrida, promedie también la columna de “Valor digital”. Este será su valor de “x2”, sabiendo que “y2” será el valor mostrado por la pantalla del sensor cuando tomó dichos datos.
8. Calcule la ecuación de la recta con estos datos, esta será su ecuación de calibración. Reemplace la que se encuentre en el código bajo el comentario “Ecuación de calibración” por la ecuación calculada.

Mantenimiento

Tanque: El tanque debe ser lavado al finalizar cada bloque de prácticas con el fin de evitar incrustaciones y con esto la pérdida de transparencia del tanque. Preste especial atención al borde entre el fondo y las paredes del tanque, donde tiende a acumularse suciedad que podría caer al tanque en el tiempo de uso. Utilice una esponja suave que no raye la superficie del acrílico.

E.3. Manual de equipo para la torre de enfriamiento de tiro inducido

Diagrama de equipo

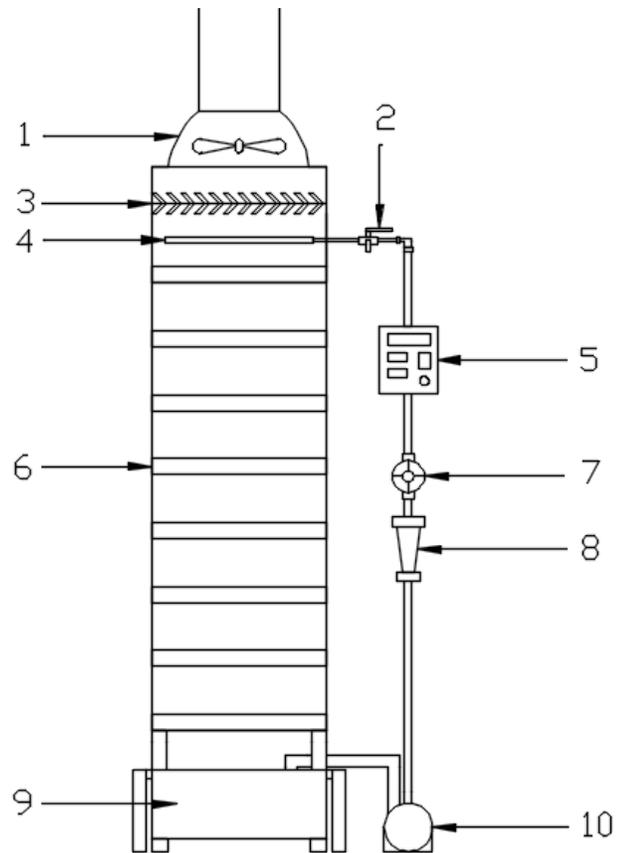


Figura 1. Diagrama del módulo de torre de enfriamiento de tiro inducido.

Donde

- 1: Ventilador
- 2: Válvula para toma de muestras
- 3: Eliminador de arrastre
- 4: Rociador
- 5: Controlador de temperatura
- 6: Rejillas
- 7: Válvula para control de flujo
- 8: Rotámetro

9: Tanque con resistencia

10: Bomba

Modo de operación

Arranque

Para su funcionamiento, el equipo debe contar con una fuente de agua, así como conexión eléctrica.

- Agua: Cuando el tanque se encuentre vacío, utilice una manguera para llenarlo. Para esto, primero verifique que la válvula de purga está cerrada. Luego conecte una manguera en la válvula de agua del laboratorio más cercana. Sostenga la manguera mientras abre la válvula y realiza el llenado. Llene el tanque hasta unos 6 cm de su capacidad máxima.
- Conexiones eléctricas: Para el funcionamiento de la torre, debe conectar tres dispositivos distintos al tomacorriente más cercano; estos son, el ventilador, la bomba, y la resistencia por medio de su controlador. Para su arranque, conecte el ventilador y la resistencia, sin embargo, conecte la bomba hasta que esté listo para realizar su experimento.
- Válvulas: Para iniciar, verifique que la válvula de toma de muestras se encuentre cerrada y la de regulación de flujo se encuentre abierta.

Procedimiento de uso

12. Verifique que el tanque de agua se encuentra lleno.
13. Conecte el controlador de la resistencia y fije una temperatura. Inicie el calentamiento. Mientras el agua alcanza dicha temperatura, lleve a cabo el paso siguiente.
14. Conecte y encienda el ventilador. Fije una velocidad de giro utilizando el reóstato y realice las mediciones de velocidad correspondientes por medio del termo anemómetro, para posteriormente calcular el flujo de aire.

15. Cuando la temperatura alcance el valor deseado, conecte la bomba y regule un flujo en el rotámetro, por medio de su válvula correspondiente.
16. Tome las mediciones respectivas. (Al menos dos muestras por corrida)
 - Mida la temperatura y humedad relativa del aire de salida en la parte superior de la torre, a través de los orificios en su pared, utilizando el termo anemómetro.
 - La temperatura y humedad relativa del aire de entrada, acercando el termo anemómetro a la entrada del aire en la parte baja de la torre. Cuide no mojar el termo anemómetro.
 - Para la temperatura del agua de entrada extraiga una muestra de agua en un beaker, utilizando la válvula en la parte alta de la torre. Utilice un termómetro convencional.
 - Para la temperatura del agua de salida, sostenga un beaker en la parte baja de la torre, y recolecte una muestra a la que le pueda medir la temperatura utilizando un termómetro convencional.
17. Cuando haya terminado, apague la bomba y permita que el agua vuelva a la temperatura deseada.
18. Alcanzada la temperatura, encienda la bomba, cambie el flujo de agua y realice otra corrida.

Cuidados con el equipo y realización de la práctica

- Al llenar el tanque, nunca lo haga por debajo o hasta un nivel muy cercano a la entrada de agua en la tubería de succión, esto para evitar que el nivel baje y la bomba succione aire. Siempre debe superar ese nivel y llegar hasta unos 6 cm por debajo de su capacidad máxima, es decir, el borde del tanque. Tenga en cuenta que el nivel que tiene el tanque cuando la bomba está apagada y el que tiene al estar prendida son distintos. Esto debido a que durante la realización del experimento, hay un volumen de agua dentro de las tuberías y descendiendo por la torre.

- Al medir las condiciones del aire de entrada, acerque el sensor a la parte baja de la torre lo mayor posible, pero tenga el cuidado de que este no se moje con el agua que cae de la torre al tanque.

Mantenimiento

Tanque: Al tanque se le forman incrustaciones a largo plazo, además, cuando la torre no ha sido usada por cierto tiempo, retiene la suciedad acumulada dentro de la torre durante este período. Esta suciedad es arrastrada por el agua después de la primera corrida. Por esta razón, el tanque debe ser lavado con jabón y esponja abrasiva, al inicio y final de cada semestre. Al inicio del semestre, se recomienda circular agua por la torre, para eliminar el polvo acumulado dentro de esta.

Apéndice F. Códigos de programación para la automatización de la toma de datos

F.1. Código de programación para la automatización de la toma de datos en el tanque agitado con aireación.

F.1.1. Código principal del experimento.

```
import os
import time
import board
import busio
import adafruit_ads1x15.ads1115 as ADS
from adafruit_ads1x15.analog_in import AnalogIn
import matplotlib.pyplot as plt

i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
ads = ADS.ADS1115(i2c)

Nombre = input("Escriba el nombre de su experimento y presione Enter para continuar: ")
print("El nombre de su experimento será "+Nombre)
Flujo = input("Escriba la lectura de flujo de aire [L/min] y presione Enter para continuar: ")
print("Introdujo un flujo de aire de "+Flujo+" L/min")
RPM = input("Escriba el valor de agitación [RPM] y presione Enter para continuar: ")
print("Introdujo un flujo de aire de "+Flujo+" L/min")
input("Presione Enter para comenzar el experimento")

plt.style.use('fivethirtyeight')

fig1 = plt.figure()
ax1 = fig1.add_subplot(111)
ax1.set_ylabel('Oxigeno disuelto [ppm]')
ax1.set_xlabel('Tiempo [s]')
ax1.set_title('Tanque agitado')

fig1.tight_layout()
fig1.show()
```

```

x = []
y1 = []

file = open("/home/pi/"+Nombre+".csv", "a")
t0 = time.time()
tiempo = 0
t = 0
print("Registrando datos...")
if os.stat("/home/pi/"+Nombre+".csv").st_size == 0:
    file.write("Tiempo [s],Oxigeno disuelto [ppm],Flujo aire [L/min], Agitacion [RPM]\n")
    while True:
        tiempo = time.time()-t0
        t = round(tiempo, 1)
        ppm = 11.618912*chan.voltage-10.051091
        file.write(str(t)+","+str(round(ppm,2))+","+str(Flujo)+","+str(RPM)+"\n")
        file.flush()
        print("Duración del experimento "+str(t)+" s")

        x.append(t)
        y1.append(ppm)

    ax1.plot(x, y1, color='r', label='ppm')

    fig1.canvas.draw()

    ax1.set_xlim(left=max(0, t-50), right=t+10)

    time.sleep(0.8)

file.close()
plt.colse()

```

F.2. Códigos de programación para la automatización de la toma de datos en la torre de pared húmeda.

F.2.1. Código principal del experimento.

```

import os
import time

```

```

import sht85_driver
import Ds18b20
import BMP085
from time import sleep
from datetime import datetime
import matplotlib.pyplot as plt

```

```

Nombre = input("Escriba el nombre de su experimento y presione Enter para continuar: ")
print("El nombre de su experimento será "+Nombre)
Rotametro_agua = input("Escriba la lectura del flujo de AGUA [cm3/min] y presione Enter para continuar: ")
print("Introdujo un flujo de agua de "+Rotametro_agua+" cm3/min")
Rotametro_aire = input("Escriba la lectura del flujo de AIRE [L/min] y presione Enter para continuar: ")
print("Introdujo un flujo de aire de "+Rotametro_aire+" L/min")
input("Presione ENTER para iniciar el registro de datos")

```

```

plt.style.use('fivethirtyeight') #Estilo del grafico

```

```

fig1 = plt.figure()
ax1 = fig1.add_subplot(111)
ax1.set_ylabel('Humedad relativa [%]')
ax1.set_xlabel('Tiempo [s]')
ax1.set_title('Humedad')

```

```

ax2 = fig1.add_subplot(111)

```

```

fig1.tight_layout()
fig1.show()

```

```

fig2 = plt.figure()

```

```

ax3 = fig2.add_subplot(111)
ax3.set_ylabel('Temperatura [C]')
ax3.set_xlabel('Tiempo [s]')
ax3.set_title('Temperatura')

```

```

ax4 = fig2.add_subplot(111)
ax5 = fig2.add_subplot(111)
ax6 = fig2.add_subplot(111)

```

```

fig2.tight_layout()

```

```
fig2.show()
```

```
i = 0
```

```
x = []
```

```
y1 = []
```

```
y2 = []
```

```
y3 = []
```

```
y4 = []
```

```
y5 = []
```

```
y6 = []
```

```
file = open("/home/pi/"+Nombre+".csv", "a")
```

```
t0 = time.time()
```

```
tiempo = 0
```

```
t = 0
```

```
print("Registrando datos...")
```

```
if os.stat("/home/pi/"+Nombre+".csv").st_size == 0:
```

```
    file.write("Tiempo [s],T Aire arriba [C],Hum Relativa arriba[%],T Aire abajo [C],Hum  
Relativa abajo[%],T Agua arriba [C],T Agua abajo [C],Presión atmosférica [Pa],Flujo Agua  
[cm3/s],Flujo Aire[L/s]\n")
```

```
    try:
```

```
        while True:
```

```
            tiempo = time.time()-t0
```

```
            t = round(tiempo , 1)
```

```
            t1,rh1 = sht85_driver.sensor_arriba()
```

```
            t2,rh2 = sht85_driver.sensor_abajo()
```

```
            T_agua_arriba = Ds18b20.read_temp_arriba()
```

```
            T_agua_abajo = Ds18b20.read_temp_abajo()
```

```
            P = BMP085.BMP085().read_pressure()
```

```
file.write(str(round(tiempo,2))+","+str(t1)+","+str(rh1)+","+str(t2)+","+str(rh2)+","+str(T_a  
gua_arriba)+","+str(T_agua_abajo)+","+str(P)+","+str(Rotametro_agua)+","+str(Rotametro  
_aire)+"\n")
```

```
    file.flush()
```

```
    print("Duración del experimento "+str(t)+" s")
```

```
    #time.sleep(1)
```

```
    x.append(t)
```

```
    y1.append(rh1)
```

```
    y2.append(rh2)
```

```

y3.append(t1)
y4.append(t2)
y5.append(T_agua_arriba)
y6.append(T_agua_abajo)

ax1.plot(x, y1, color='r', label='HR arriba')
ax2.plot(x, y2, color='g', label='HR abajo')
ax3.plot(x, y3, color='r', label='Aire arriba')
ax4.plot(x, y4, color='g', label='Aire abajo')
ax5.plot(x, y5, color='c', label='Agua arriba')
ax6.plot(x, y6, color='y', label='Agua abajo')

fig1.canvas.draw()
fig2.canvas.draw()

lista1 = [rh1, rh2]
lista2 = [t1, t2, T_agua_arriba, T_agua_abajo]

ax1.set_xlim(left=max(0, t-50), right=t+10)
ax3.set_xlim(left=max(0, t-50), right=t+10)

ax1.set_ylim(bottom=min(lista1)-5, top=max(lista1)+5)
ax3.set_ylim(bottom=min(lista2)-2, top=max(lista2)+2)

if i==0:
    plt.legend()

i=i+1

time.sleep(1)

file.close()
plt.close()

except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
    print("PROCESO TERMINADO")
    time.sleep(0.5e-3)

```

F.2.2. Controlador necesario para el uso de los sensores de humedad relativa Sht85

```
import smbus
```

```

import time
#import math

bus3 = smbus.SMBus(3)
bus4 = smbus.SMBus(4)

SHT85_ADDR    = 0x44
SHT85_SS      = 0x24
SHT85_SS_2    = {'HIGH' : 0x00, 'MEDIUM' : 0x0B, 'LOW' : 0x16}
SHT85_P       = {0.5 : 0x20, 1 : 0x21, 2 : 0x22, 4 : 0x23, 10 : 0x27}
SHT85_P_2     = {0.5 : (0x32,0x24,0x2F), 1 : (0x30,0x26,0x2D), 2 : (0x36,0x20,0x2B), 4 :
(0x34,0x22,0x29), 10 : (0x37,0x21,0x2A)}
SHT85_ART     = 0x2B
SHT85_ART_2   = 0x32
SHT85_STOP    = 0x30
SHT85_STOP_2  = 0x93
SHT85_RESET   = 0x30
SHT85_RESET_2 = 0xA2
SHT85_HEATER  = 0x30
SHT85_HEATER_ON = 0x6D
SHT85_HEATER_OFF = 0x66
SHT85_STATUS  = 0xF3
SHT85_STATUS_2 = 0x2D
SHT85_CLEAR   = 0x30
SHT85_CLEAR_2 = 0x41
SHT85_SN      = 0x36
SHT85_SN_2    = 0x82

SHT85_READ    = 0x00

def sensor_arriba():

    bus3.write_i2c_block_data(SHT85_ADDR,SHT85_SS,[SHT85_SS_2['HIGH']])
    time.sleep(0.5)
    data = bus3.read_i2c_block_data(SHT85_ADDR,SHT85_READ,6)
    t_data = data[0] << 8 | data[1]
    h_data = data[3] << 8 | data[4]
    temp = -45. + 175. * t_data / (2**16-1.)
    relh = 100. * h_data / (2**16-1.)
    return round(temp,4), round(relh,4)

def sensor_abajo():

```

```

bus4.write_i2c_block_data(SHT85_ADDR,SHT85_SS,[SHT85_SS_2['HIGH']])
time.sleep(0.5)
data = bus4.read_i2c_block_data(SHT85_ADDR,SHT85_READ,6)
t_data = data[0] << 8 | data[1]
h_data = data[3] << 8 | data[4]
temp = -45. + 175. * t_data / (2**16-1.)
relh = 100. * h_data / (2**16-1.)
return round(temp,4), round(relh,4)

```

F.2.3. Controlador necesario para el uso de los sensores de temperatura Ds18b20

```

import os
import glob
import time

os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

device_file_arriba = '/sys/bus/w1/devices/28-03139779f8f6/w1_slave'
device_file_abajo = '/sys/bus/w1/devices/28-031297796b1e/w1_slave'

def read_temp_raw_arriba():
    f_arriba = open(device_file_arriba, 'r')
    lines_arriba = f_arriba.readlines()
    f_arriba.close()
    return lines_arriba

def read_temp_arriba():
    lines_arriba = read_temp_raw_arriba()

    while lines_arriba[0].strip()[-3:] != 'YES':
        time.sleep(0.2)
        lines_arriba = read_temp_raw_arriba()

    equals_pos_arriba = lines_arriba[1].find('t=')

    if equals_pos_arriba != -1:
        temp_string_arriba = lines_arriba[1][equals_pos_arriba+2:]
        temp_c_arriba = float(temp_string_arriba) / 1000.0
        #temp_f = temp_c * 9.0 / 5.0 + 32.0

```

```
    return temp_c_arriba#, temp_f

def read_temp_raw_abajo():
    f_abajo = open(device_file_abajo, 'r')
    lines_abajo = f_abajo.readlines()
    f_abajo.close()
    return lines_abajo

lines_abajo = read_temp_raw_abajo()

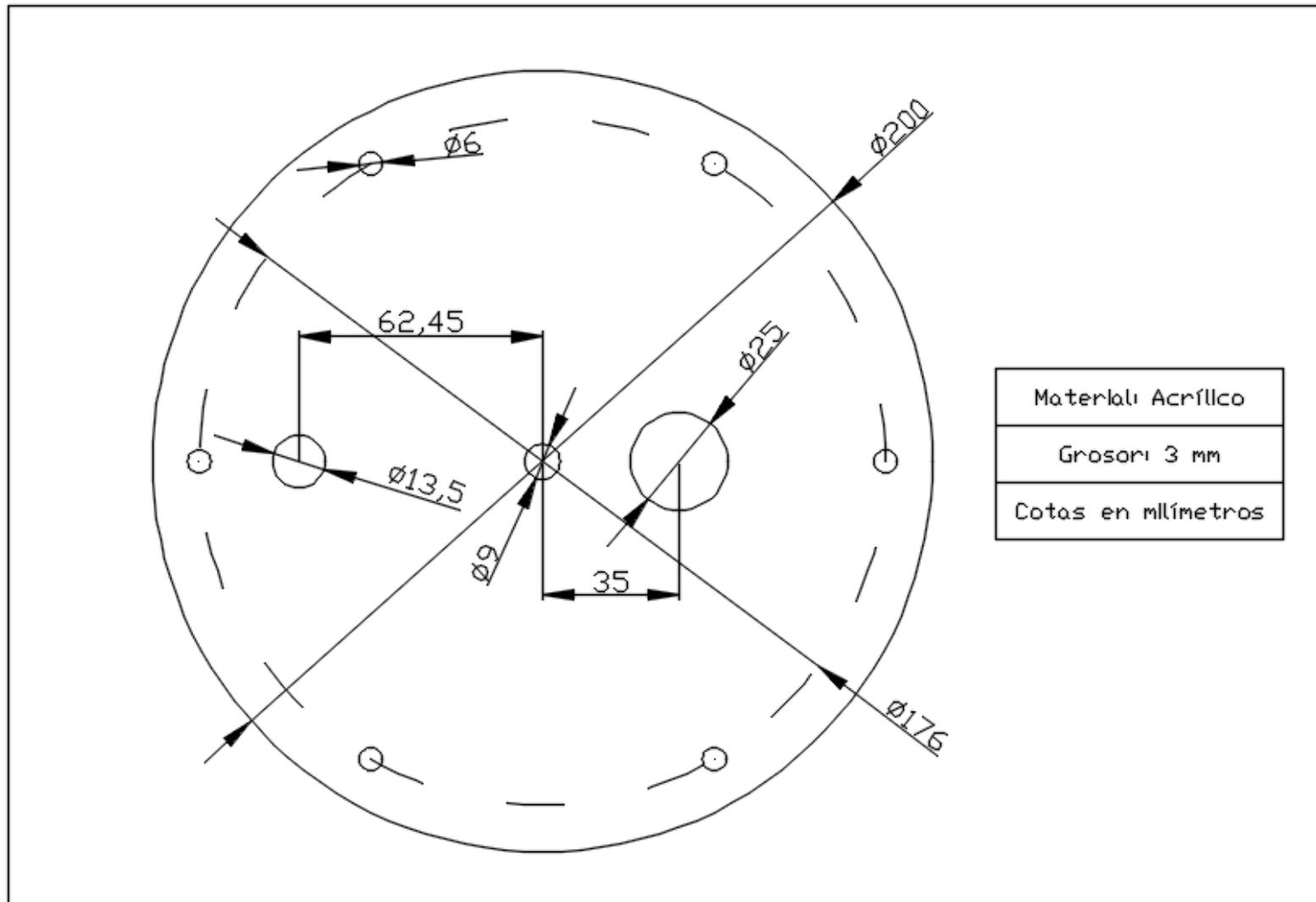
while lines_abajo[0].strip()[-3:] != 'YES':
    time.sleep(0.2)
    lines_abajo = read_temp_raw_abajo()

equals_pos_abajo = lines_abajo[1].find('t=')

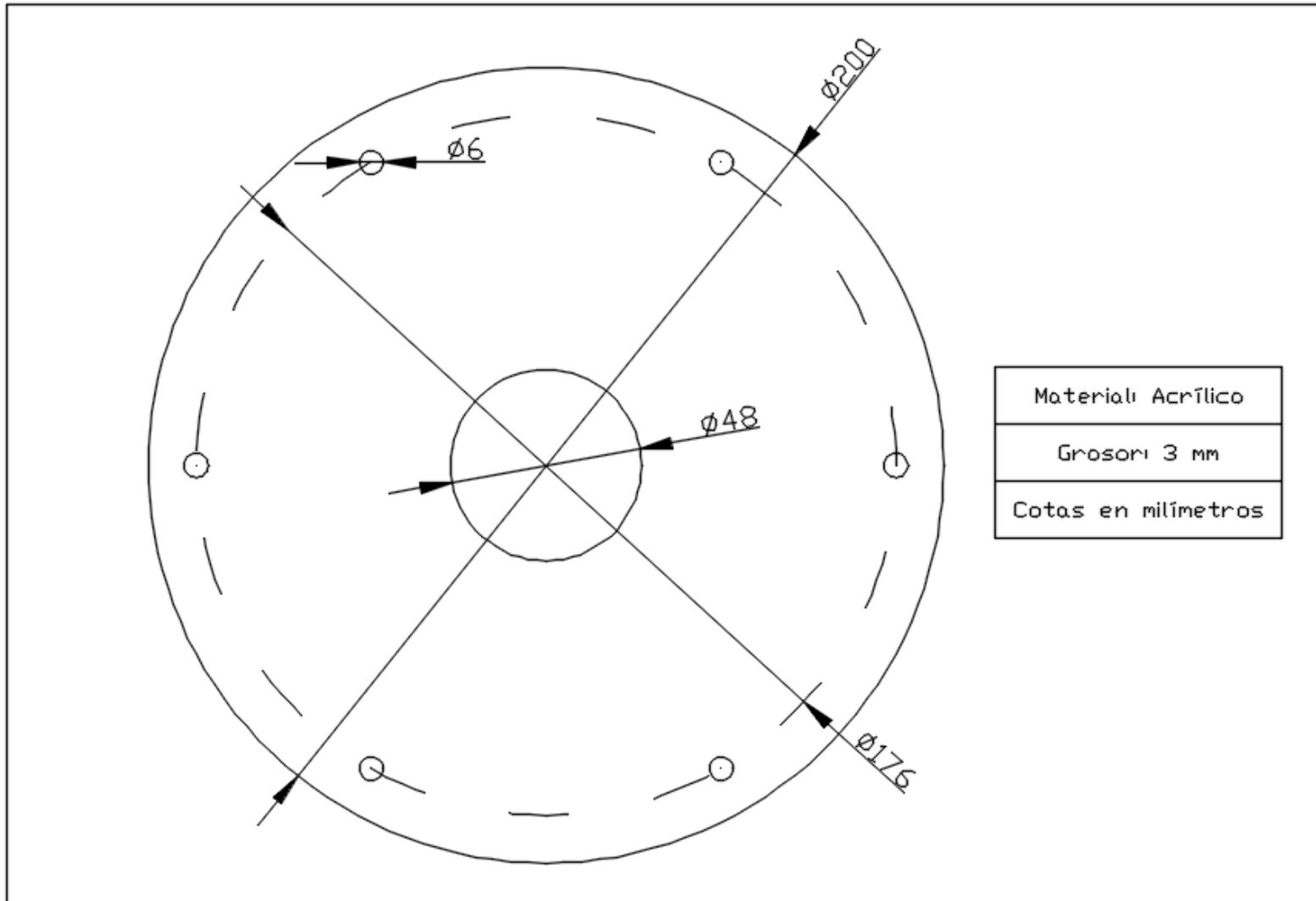
if equals_pos_abajo != -1:
    temp_string_abajo = lines_abajo[1][equals_pos_abajo+2:]
    temp_c_abajo = float(temp_string_abajo) / 1000.0
    #temp_f = temp_c * 9.0 / 5.0 + 32.0
    return temp_c_abajo#, temp_f
```

Anexos

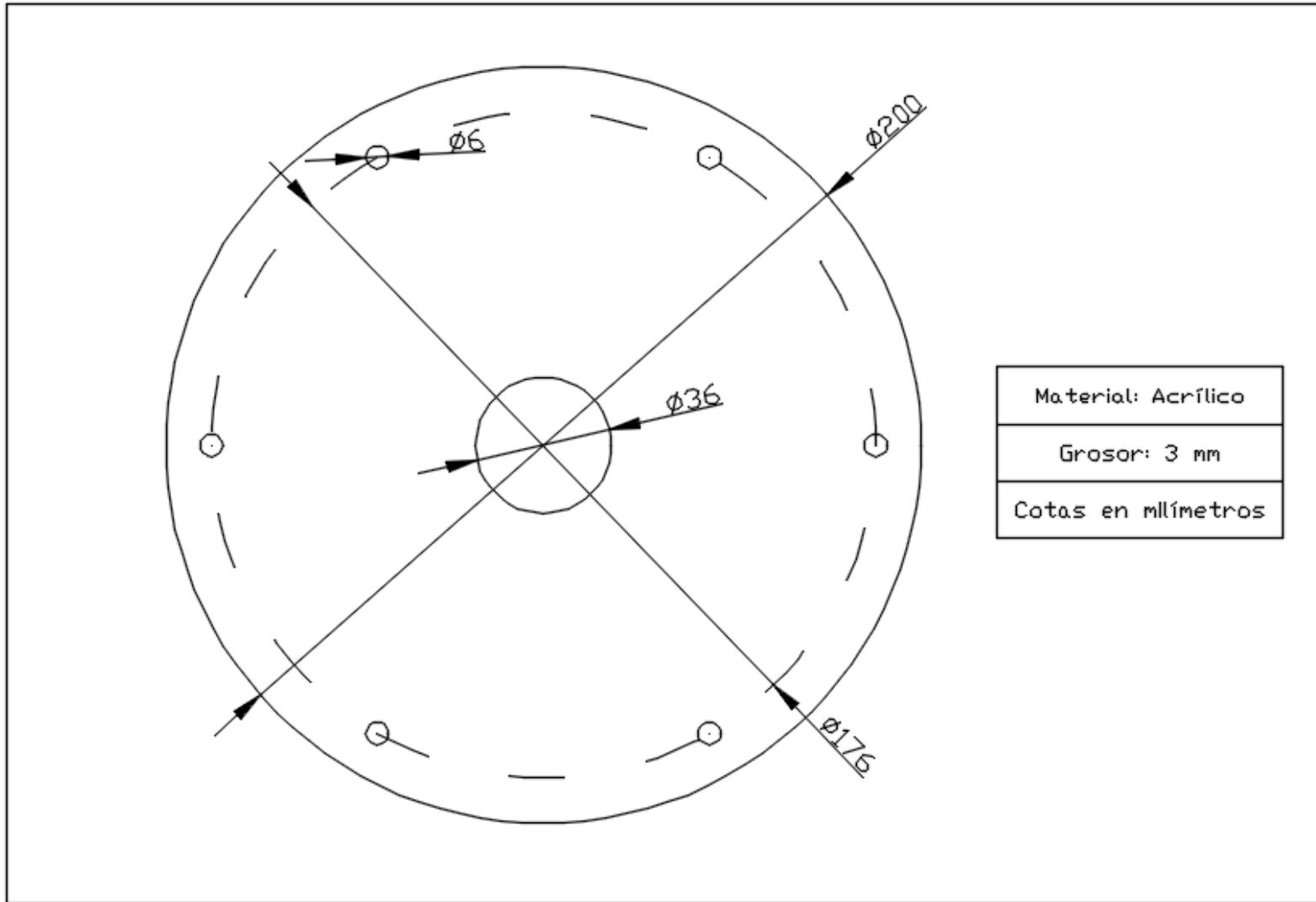
Plano constructivo de la tapa del tanque agitado



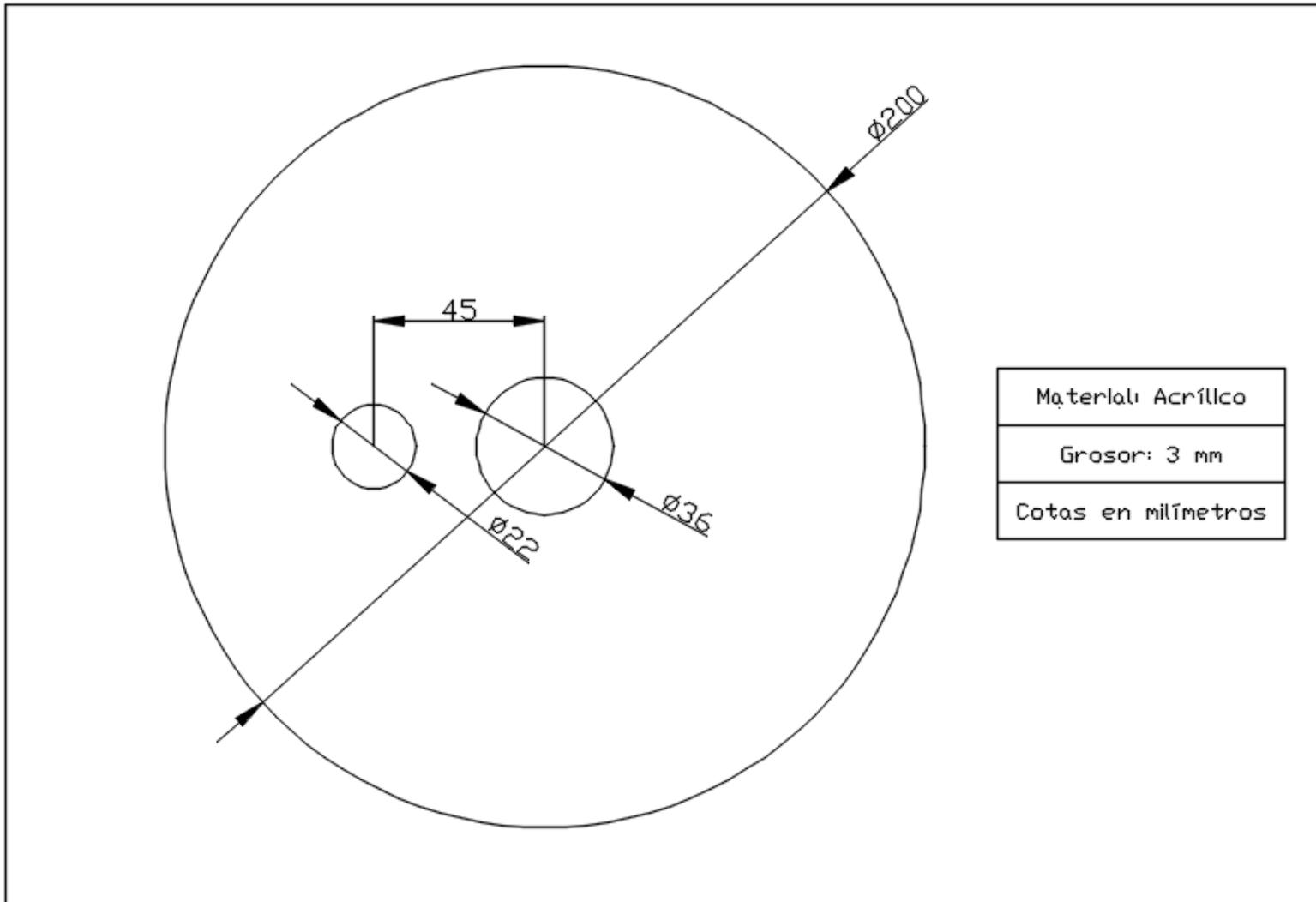
Plano constructivo de la tapa del depósito superior de la torre de pared húmeda



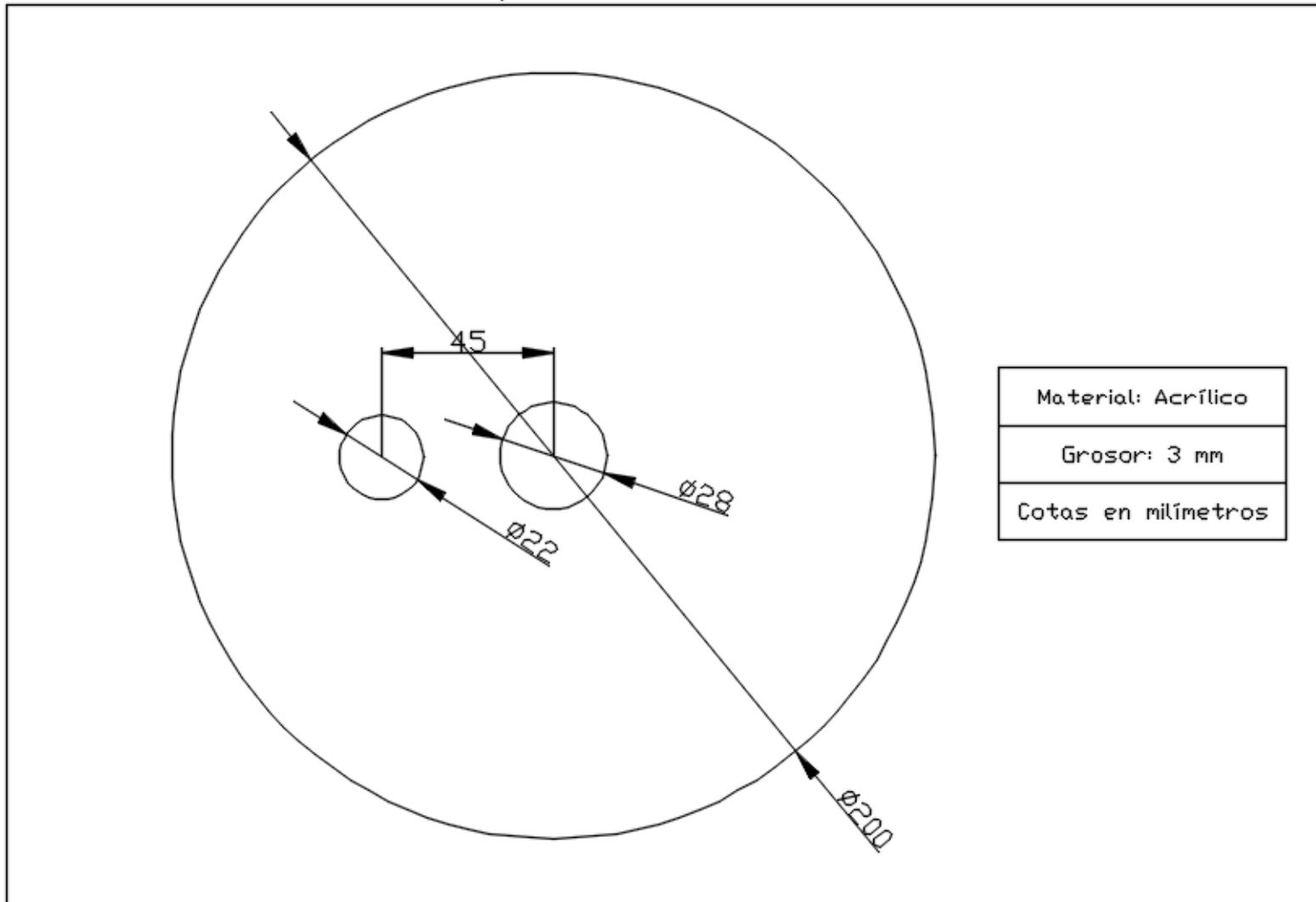
Plano constructivo de la tapa del depósito inferior de la torre de pared húmeda



Plano constructivo del fondo del depósito superior de la torre de pared húmeda



Plano constructivo del fondo del depósito inferior de la torre de pared húmeda



Plano constructivo del anillo de sujeción para la tapa del tanque agitado y depósitos de la torre de pared húmeda

