



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ACONDICIONAMIENTO DE LA TORRE DE
ENFRIAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD
JOSÉ ANTONIO PÁEZ COMO SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO AL LABORATORIO DE
LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Autor: Blanco A. Martin J.

C.I. 24.300.071

Urb. Yuma II, Calle N.º 3, Municipio San Diego

Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

**ACONDICIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ COMO SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO AL LABORATORIO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA
MECÁNICA**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO.

Autor: Blanco A. Martín J.
C.I.: 24.300.071
Tutor: Ing. Franklin Camejo

San Diego, noviembre 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M-003-2017-2

Valencia, 07 de Julio de 2017.

Ciudadano:
Blanco Martín
C.I. 24.300.071
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 07/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado " ACONDICIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ COMO SISTEMA DE ENFRIAMIENTO A LA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA." presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Franklin Camejo, C.I. 13.045.723 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Zulay Salcedo
Prof. Zulay Salcedo
Decana (E) de la Facultad de Ingeniería

c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).

ZS/ff



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ing. Franklin Camejo, portador de la cédula de identidad N.º 13.045.723, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Martin Jose Blanco Abreu, portador de la cédula de identidad N.º 24.300.071, titulado **“ACONDICIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PÁEZ COMO SISTEMA DE ENFRIAMIENTO A LA ESCUELA DE INGENIERÍA”**, presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los quince días del mes de noviembre del año dos mil diecisiete.

Ing. Franklin Camejo

N.º 13.045.723

ÍNDICE

Contenido

LISTADO DE FIGURAS.....	xiv
LISTADO DE TABLAS.....	xix
LISTADO DE GRÁFICOS.....	xxiii
RESUMEN INFORMATIVO.....	xxiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULOS	
EL PROBLEMA	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Objetivos de la investigación	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Justificación de la investigación	3
1.5. Limitaciones	4
1.6. Alcance	4
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Bases teóricas	8
2.2.1 Procesos de Transferencia de Calor.....	8
2.2.1.1 Calor y temperatura	10
2.2.1.2 Mecanismos de transferencia de calor.....	10
2.2.1.3 Conducción de calor en régimen transitorio.....	12
2.2.2 Intercambiadores de Calor.....	14
2.2.3 Tipos de Intercambiadores de Calor Según su aplicación.....	15

2.2.4	Función de los Intercambiadores de Calor	17
2.2.5	Proceso de Refrigeración.....	17
2.2.6	Proceso de Condensación	17
2.2.7	Procesos de Enfriamiento del Agua.....	18
2.2.8	Torre de enfriamiento	18
2.2.9	Tipos de torres de enfriamiento	18
	2.2.9.1 Torres de circulación natural	19
	2.2.9.2 Componentes Básicos de las Torres de Enfriamiento	22
	2.2.9.3 Funcionamiento de una Torre de Enfriamiento	28
2.2.10	Recirculación	29
2.2.11	Restricción del flujo de Aire	29
2.2.12	Viento.....	30
2.2.13	Interferencia	30
2.2.14	Ciclos Térmicos	31
2.2.16	Ciclo Rankine.....	36
2.2.17	Sistemas de tuberías	40
2.2.18	Características Física del agua	40
2.2.19	Características físicas del aire	42
2.2.20	Disponibilidad en tuberías	46
2.2.21	Regímenes en función del número de Reynolds	47
2.2.22	Número de Reynolds.....	48
2.2.23	Caída de presión y pérdida de carga	50
2.2.24	Bomba centrífuga.....	53
2.2.25	Cálculos básicos.....	54

2.2.26	Curvas características de bombas	55
2.2.27	Reglas de semejanza	56
2.2.28	Transferencia de calor	59
2.2.29	Eficiencia de una Torre de enfriamiento.....	61
2.2.30	Problemas Comunes Presentes en los Sistemas de Enfriamiento de Agua.....	61
2.2.31	Características del agua que deben tomarse en consideración.....	62
2.2.32	Problemas frecuentes en los diferentes sistemas.....	63
2.2.33	Fallas comunes en torres de enfriamiento.....	64
2.2.34	Mantenimiento de componentes	66
2.2.35	Tanque de agua	67
	2.3 Definición de conceptos básicos.....	68
	MARCO METODOLÓGICO	74
3.1	Enfoque de la investigación	74
3.2	Tipo de Investigación	75
3.3	Diseño de la investigación.....	75
3.4	Nivel de la Investigación.....	76
3.5	Población y Muestra.....	76
3.6	Fases Metodológicas	77
	RESULTADOS	82
	4.1 Estado actual de la torre.....	82
4.1.1	Ubicación de la torre.....	82
4.1.2	Componentes de la torre	85
4.1.3	Proceso de la torre de enfriamiento	88

4.1.4 Resumen de estado actual.....	89
4.2 Evaluación termodinámica de la torre de enfriamiento	91
4.2.1 Especificación de la torre de enfriamiento	91
4.2.2 Datos de operación de la torre de enfriamiento obtenidos del trabajo de instalación de la torre por el Ingeniero Jordán Rodríguez a continuación tabla 3 parámetros de la torre de enfriamiento:	92
4.2.3 Cálculos de la torre	92
4.2.4 Plan de acondicionamiento	94
4.2.5 Recalculo real de la torre de enfriamiento	95
4.2.6 Propuesta de mejora selección de dos nuevas bombas	100
4.3 Redacción de mejoras a implementar y prácticas de laboratorio	117
4.3.1 Prácticas de Laboratorio	117
4.3.2 Elaboración del plan de mantenimiento preventivo y correctivo	121
4.3.3 Estado del mantenimiento preventivo en el sistema de la torre de enfriamiento 121	
4.3.4 Recolección de la información necesaria para el mantenimiento.....	122
4.3.5 Inventario de componentes de la torre de enfriamiento.....	122
4.3.7 Establecimiento de programación del mantenimiento.....	127
CONCLUSIONES	154
RECOMENDACIONES	156
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157

LISTADO DE FIGURAS

CONTENIDO.....

Figura

		PP.
1	Representación gráfica de un intercambiador de calor de tubo en U con sus partes.....	16
2	Representación breve de una torre de enfriamiento de circulación natural y sus componentes más importantes.....	20
3	Representación gráfica de una torre de enfriamiento del tipo de tiro inducido y sus componentes más importantes.....	22
4	Representación gráfica de una torre de enfriamiento del tipo de contraflujo y sus componentes más importantes.....	22
5	Representación gráfica de una torre de enfriamiento de flujo cruzado y sus componentes más importantes	23
6	Representación gráfica de una torre de enfriamiento abierta y sus componentes más importantes.....	24
7	Estructura de una torre de enfriamiento y sus componentes	25
8	Representación gráfica de una chimenea para una torre de enfriamiento.....	26
9	Representación de los componentes de una torre de enfriamiento.	27
10	Componentes Torre de enfriamiento.....	30
11	Funcionamiento de una torre y sus componentes.....	31
12	Grafica operacional de una torre de enfriamiento.....	32
13	Representación gráfica de un ciclo de Carnot.....	34
14	Diagrama P-V de un ciclo de Carnot.....	35
15	Comparación de eficiencias de una máquina de Carnot.....	36
16	Diagrama de eficiencia de Carnot.....	36
17	Diagrama T-s de un ciclo Rankine.....	38

18	Diagrama de un ciclo Rankine.....	39
19	Ejemplo de aumento de velocidad en una tubería.....	48
20	Diagrama de Moody.....	52
21	Esquema de una bomba centrífuga típica.....	52
22	Diagrama P-V de un ciclo de Carnot	55
23	Curvas características de una bomba centrífuga.	57
24	Curvas características adimensionales de una bomba.	58
25	Parábola de isoeficiencia.	59
26	Ubicación de la torre de enfriamiento en la universidad.	83
27	Localización de la torre de enfriamiento.	85
28	Catálogo de Torres de enfriamiento de 8-80	85
29	Catálogo de Torres de enfriamiento de 8-80 base	86
30	Partes visibles de la torre de enfriamiento.	87
31	Instalación de la torre de enfriamiento.	87
32	Catálogo de Pedrollo Dimensiones	90
33	Catálogo de Pedrollo Caudales.	90
34	Diagrama de proceso del laboratorio de la Universidad Jose Antonio Páez.	91
35	Estado actual de la torre de enfriamiento.	92
36	Catálogo de especificaciones de la torre de enfriamiento.	92
37	Análisis de transferencia de calor en la torre de enfriamiento.	97
38	Conductividad térmica de diferentes materiales	98
39	Coeficiente de transferencia de calor h	98
40	Diagrama de las tuberías de la torre de Enfriamiento línea de agua fría	101
41	Especificaciones de las tuberías de la torre de Enfriamiento agua caliente	101
42	Diámetros de tuberías interna y externas.	102

43	Densidades y otras propiedades del agua a diferente temperatura.	103
44	Diagrama de Moody con los cálculos de los factores de fricción de Darcy agua fría.	105
45	Valores de Ka, obtenidos experimentalmente.	106
46	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm Punto 1 agua fría.	107
47	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm, parábola de isoeficiencia agua fría.	108
48	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm y potencia agua fría	110
49	Diagrama de Moody con los cálculos de los factores de fricción de Darcy caliente.	112
50	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm calculo punto 1 agua caliente	114
51	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm parábola de isoeficiencia agua caliente.	115
52	Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm potencia agua caliente.	117
53	. Diagrama de funcionamiento de torre de enfriamiento	120

NOMENCLATURA DE ABREVIATURAS

%deRecorte	Porcentaje de recorte
A	Área
Cpa	Calor específico del aire
Cpw	Calor específico del agua
D	Diámetro
F	Factor de Darcy
G	Gravedad
H	Altura
Hb	Altura manométrica de una bomba
Hc	h convectivo
Hd	Altura de descarga
he1	Entalpia de entrada fluido caliente
he2	Entalpia de entrada fluido frio
Hf	Perdidas primarias en un tramo
HI	Pérdidas totales en un tramo
Hm	Pérdidas totales en un tramo
Φ (%)	Humedad relativa
Hr	h de radiación
hs1	Entalpia de salida fluido caliente
hs2	Entalpia de salida fluido frio
Hsuc	Altura de succión
K	Conductividad térmica
Ka	Coficiente de perdidas por accesorios
Khq	Relación entre altura y caudal
L	Longitud
Ma	Flujo másico de aire
Mw	Flujo másico de agua
N	Velocidad de rotación
NPSH	Carga neta positiva de succión
P	Presión
Pot	Potencia

Continuación. Nomenclatura de abreviaturas

Rt, rad	Resistencia térmica de radiación
Rtotal	Resistencia térmica total
T	Delta o diferencia de temperaturas
Ta1	Temperatura de salida del aire
Ta2	Temperatura de entrada del aire
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo
Tbs	Temperatura de bulbo seco
Tw1	Temperatura de entrada del agua
Tw2	Temperatura de salida del agua
V	Velocidad
Z	Altura de tubería
	Peso específico
	Eficiencia de una torre de enfriamiento
	Viscosidad cinemática
	Densidad
\sqrt{a}	Volumen específico

Datos recopilados.

LISTADO DE TABLAS

CONTENIDO.....	Pp
Tabla	
1	Guía de fallas en torres de enfriamiento 67
2	Parámetros de operación de la torre de enfriamiento. 93
3	Recolección de datos 1 107
4	Recolección de datos 2 114
5	Recolección de datos para practicas 121
6	Eliminadores de arrastre. 124
7	Relleno de contacto 124
8	Tanque colector. 124
9	Carcasa 125
10	Ventilador. 125
11	Torre de enfriamiento. 126
12	Bombas de agua. 126
13	Registro de mantenimiento 127
14	Leyenda de mantenimiento. 128
15	Programa de mantenimiento 129
16	Programa de mantenimiento de bombas 131
17	Programación diaria de mantenimiento. 132
18	Programación diaria de mantenimiento del ventilador. 132
19	Programación diaria de mantenimiento del motor eléctrico 133
20	Programación diaria de mantenimiento del eje de transmisión. 133
21	Programación diaria de mantenimiento de la caja reductora. 133
22	Programación diaria de mantenimiento del sistema rociador. 134
23	Programación semanal de mantenimiento. 134
24	Programación semanal de mantenimiento caja reductora 135

25	Programación semanal de mantenimiento tanque de agua.	135
26	Programación Mensual de mantenimiento.	136
27	Programación Mensual de mantenimiento caja reductora.	136
28	Programación Mensual de mantenimiento eliminadores.	137
29	Programación Mensual de mantenimiento sistema rociador.	137
30	Programación Mensual de mantenimiento filtros de succión	137
31	Programación Mensual de mantenimiento bombas.	138
32	Programación Semestral de mantenimiento.	139
33	Programación mensual de mantenimiento sistema rociador	140
34	Programación Semestral de mantenimiento motor eléctrico.	140
35	Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión.	141
36	Programación Semestral de mantenimiento caja reductora.	141
37	Programación Semestral de mantenimiento cilindro del ventilador	142
38	Programación Semestral de mantenimiento relleno.	142
39	Programación Semestral de mantenimiento sistema rociador	143
40	Programación Semestral de mantenimiento carcaza	143
41	Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión.	144
42	Programación Semestral de mantenimiento válvula flotante	144
43	Programación Semestral de mantenimiento válvula flotante	145
44	Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión	145
45	Programación Semestral de mantenimiento válvula de control	146
46	Programación anual de mantenimiento.	147
47	Programación anual de mantenimiento ventilador y protector.	147
48	Programación anual de mantenimiento eje de transmisión	148
49	Programación anual de mantenimiento eliminadores.	148

50	Programación anual de mantenimiento tanque de agua	149
51	Programación anual de mantenimiento válvula flotante.	149
52	Programación cuando lo requiera de mantenimiento	150
53	Programación cuando se requiera de mantenimiento ventilador y protector.	150
54	Programación cuando se requiera de mantenimiento motor eléctrico.	151
55	Programación cuando se requiera de mantenimiento eje de transmisión.	151
56	Programación cuando se requiera de mantenimiento caja reductora	151
57	Programación cuando se requiera de mantenimiento eliminadores.	152
58	Programación cuando se requiera de mantenimiento relleno	152
59	Programación cuando se requiera de mantenimiento rociadores.	152
60	Programación cuando se requiera de mantenimiento ventilador y protector.....	153
61	Programación cuando se requiera de mantenimiento filtros de succión.....	153
62	Programación cuando se requiera de mantenimiento válvulas de control.	153
63	Programación de mantenimiento planta física.	154

LISTADO DE GRÁFICOS

CONTENIDO..... Pp

Grafico

- 1 Gráfico de temperaturas de salida del agua y eficiencia vs 100
caudales de agua.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

**ACONDICIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA
UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PÁEZ COMO SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO A LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Autor: Blanco A. Martin J.

Tutor: Ing. Franklin Camejo.

Fecha: noviembre 2017

RESUMEN INFORMATIVO

Este proyecto tuvo como objetivo general evaluar y acondicionar la torre de enfriamiento de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad José Antonio Páez para su aprovechamiento por medio de cálculos e investigaciones de ingeniería Metodológicamente es una investigación documental y de campo donde se desarrolla una propuesta para el aprovechamiento de un recurso que posee la universidad. Se explicaron fases y procedimientos: Primero se realizó una recopilación de información donde se detalló los componentes, midiendo y recopilando la información encontrada, para su posterior análisis, donde se evalúa el estado actual después de esto se pudo inferir que esta no estaba en condiciones aptas para su operación y se estimó una eficiencia de trabajo muy baja, luego de esto, se trazaron los pasos a seguir para su funcionamiento óptimo y cálculos para una propuesta de mejora, que se concluyó en la propuesta de seleccionar dos bombas nuevas y un nuevo motor para el ventilador para aumentar la eficiencia del enfriamiento, posterior a lo antes mencionado, con información obtenida se realizó una práctica de laboratorio con el fin de usar el equipo en prácticas para hacer una aprendizaje más dinámico y más sencillo de entender logrando realizar una práctica completa que permitirá al estudiante aprender de manera más simple y por último se realizó un plan de mantenimiento con tablas y programación de mantenimiento donde se detalla el enfoque del mantenimiento y el tiempo a realizarse. Todos estos procedimientos fueron basados en Torres de enfriamiento equipos que sirven para enfriar el agua.

Descriptor: torres de enfriamiento, termodinámica, mantenimiento, refrigeración.

INTRODUCCIÓN

Las torres de enfriamiento son estructuras que tienen una variedad de componentes que le permiten refrigerar el agua en un sistema industrial, ellas se emplean en plantas petroquímicas, refinerías de petróleo, plantas de procesamiento de gas natural y normalmente en plantas de energía para refrigerar calderas, pero pueden ser objeto de estudio y de aprendizaje y en ella se pueden efectuar prácticas de laboratorio donde se toman como parámetros a medir las diferencias de temperatura, el volumen del aire seco que sale y la velocidad con que sale, entre otras cosas y puede ser muy sustancioso para los estudiantes que al ver y trabajar con los fenómenos físicos pueden comprenderlos mejor.

La importancia de las torres de enfriamiento en un proceso industrial es grande ya que ellas permiten enfriar, el agua, permite mantener la temperatura de los procesos industriales y controlarlos, por ello entender los fenómenos que ahí se presentan y poder preservar una para su estudio podría ser fundamental para los procesos industriales y las industrias.

El trabajo de investigación se desarrolló en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Describe el planteamiento del problema, formulación del mismo, los objetivos de la investigación, la justificación y las limitaciones que se presentan al momento de solucionar el problema.

Capítulo II: Se refiere a toda terminología y conceptos necesarios que servirán de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

Capítulo III: Consta de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

Capítulo IV: Detalla los resultados obtenidos luego de realizar la investigación.

El trabajo aquí presentado, está estructurado de manera de que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender a cabalidad la

tecnología referida y las herramientas a desarrollar. Sin embargo, cabe destacar que, si el lector es lo suficientemente conocedor del tema, perfectamente puede obviar los capítulos que contengan información que considere ya conocida, y continuar con los aspectos que crea interesantes sin que se pierda la linealidad o coherencia de la información que se desea mostrar.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Las torres de enfriamiento son estructuras que se emplean y son diseñadas con la finalidad de disminuir la temperatura del agua y otros medios en plantas petroquímicas, refinerías de petróleo, plantas de procesamiento de gas natural y normalmente en plantas de energía para refrigerar calderas, pero pueden ser objeto de estudio y de aprendizaje y en ella se pueden efectuar prácticas de laboratorio donde se toman como parámetros a medir las diferencias de temperatura, el volumen del aire seco que sale y la velocidad con que sale, entre otras cosas y puede ser muy sustancioso para los estudiantes que al ver y trabajar con los fenómenos físicos pueden comprenderlos mejor. Las torres de enfriamiento o refrigeración son llamadas de esta manera porque su función principal es bajar la temperatura del agua, por esto se puede afirmar que son un tipo de intercambiador de calor que remueve a su vez calor de una corriente de agua caliente con el aire seco y frío.

Actualmente en la Universidad José Antonio Páez existe una Torre de enfriamiento ubicada detrás del edificio de Odontología y al lado del edificio de mecánica de la marca Rodelca desde el año 2007, con la finalidad de ser un equipo didáctico y de estudio del laboratorio de fluidos de la universidad y así poder enfriar agua y proporcionarla a otros equipos que se encuentran en laboratorio como por ejemplo la caldera.

Sin embargo, en la actualidad se encuentra inactiva, ya que algunas de sus piezas no se encuentran en buenas condiciones y le faltan algunas otras, fundamentales para su desempeño y funcionamiento, esto hace que no se pueda aprovechar por los estudiantes y profesores a la hora de las clases, además de la parte económica ya que en su momento requirió una inversión y es un dinero que al estarse deteriorando se pierde cada día. En las cercanías a la torre también existe cierto deterioro de las

instalaciones, la estructura presenta falta de mantenimiento, así como el perímetro donde está instalada no tiene protección, ni seguridad ya que la puerta de acceso no está en las mejores condiciones.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el nivel de aprovechamiento técnico didáctico de la torre de enfriamiento de la UJAP?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Acondicionamiento de la torre de enfriamiento de la escuela de ingeniería mecánica para su aprovechamiento por medio de cálculos e investigaciones de ingeniería.

1.3.2. Objetivos Específicos

Recopilar información relacionada con los equipos e instalaciones de la torre de enfriamiento.

Evaluar los datos obtenidos, determinando las mejoras a implementar y los ajustes pertinentes.

Elaborar una propuesta de mejora, para la operatividad y redacción de práctica de laboratorio de la torre de enfriamiento.

Preparar un plan de mantenimiento integral de la torre para garantizar el buen funcionamiento de sus equipos.

1.4. Justificación de la investigación

Este proyecto servirá para aprovechar la torre de enfriamiento que se encuentra ya instalada en la Universidad José Antonio Páez, presentado detalles de abandono que puede tener muchos potenciales usos favoreciendo tanto a la universidad como a los alumnos de la misma ya que además de tenerla operando se pueden realizar prácticas de laboratorio, ayudando así a la instrucción de los futuros ingenieros mecánicos resolviendo el problema de que el este equipo se pueda perder definitivamente.

1.5. Limitaciones

En este proyecto será una investigación documental y cuantitativa de las torres de enfriamiento, de su composición, funcionamiento, características, fenómenos que en ella ocurren, sus usos más frecuentes así como el mantenimiento que se les hace, después de hecho todo esto se hace un análisis y se aplica a la torre de enfriamiento de estudio para ser evaluada y acondicionada para su uso y aprovechamiento, por ello entre las limitaciones que puede tener el estudio se puede destacar el hecho de que enfocara en un solo tipo de torre de enfriamiento de la marca Rodelca.CA pero esto no quiere decir que no se pueda usar como ejemplo para otro estudio posterior pero si bien todas las torres de enfriamiento tienen un funcionamiento parecido su comportamiento no será el mismo, otra de las limitaciones pueden ser el tiempo de estudio comprendido entre 32 semanas.

1.6. Alcance

En el proyecto anteriormente mencionado se pretende hacer una evaluación completa de la torre de enfriamiento encontrada en la Universidad Jose Antonio Páez, posteriormente planear un acondicionamiento definiendo los puntos a corregir, los equipos que haya que adquirirse y de ser necesario lo que se deba diseñar de nuevo, esto con el fin de usar esta torre como sistema de enfriamiento para los equipos del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, como también implementar prácticas de laboratorio las cuales se deben redactar para usarlas como instrumentos académicos para instruir a los estudiantes y luego preparar un plan de mantenimiento integral a seguir para garantizar su operatividad.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

El marco teórico en términos generales, representa la “explicación” teórica para comprender la naturaleza del hecho investigado, o lo que es lo mismo, sustentar teóricamente el estudio. Constituye un aspecto de mucha importancia dentro de la investigación, donde el investigador crea un espacio en el que se apoya para comprender las situaciones del problema, como solucionarla y describir con bases teóricas el problema presente.

Es un espacio donde se contemplan también conclusiones de otras investigaciones realizadas, por otros autores, que se han interesado en aportar conocimientos de sus investigaciones, vinculadas directa o indirectamente con el problema de esta investigación.

2.1 Antecedentes

En un trabajo de grado presentado por Isidro, A(2006), titulado: **“Elaboración de un plan de mantenimiento y evaluación del sistema de la torre de enfriamiento del edificio sede PDVSA Puerto la cruz”** Presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Simón Bolívar (Caracas, Venezuela) tuvo como propósito realizar primeras acciones para la ejecución de un plan de mantenimiento preventivo, en cuanto a la organización, planificación y programación de las actividades en cada una de las partes del sistema de la torre de enfriamiento del edificio sede de PDVSA Puerto la Cruz, y la evaluación del conjunto para determinar la relación en las condiciones actuales de operación con el diseño, de modo que se puedan determinar la relación en las condiciones actuales de operación con el diseño, de modo que se puedan identificar los puntos mejorables del sistema, y hacer las observaciones del funcionamiento. basa su trabajo en las leyes termodinámicas, el estudio de las torres de enfriamiento y sus equipos, así como de las teorías de mantenimiento y la previsión de este y llego a la conclusión que en un proyecto futuro de ampliación del edificio sede PDVSA Puerto

la Cruz, se podrá seguir trabajando con la torre de enfriamiento, debido a su sobre-diseño , apor to fenómenos físicos, químicos y termodinámicos estudiados en ella para que tienen que ver directamente con las torres de enfriamiento y además la realización del mantenimiento sistemático que ayudo a la programación.

Por otra parte Chareo, J (2013), en su trabajo de grado titulado: **“Mantenimiento Preventivo Y Correctivo a Torres de Enfriamiento”** Presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana en México, tuvo como propósito conocer las condiciones típicas del funcionamiento de las torres de enfriamiento para así diseñar y aplicar el mantenimiento preventivo y correctivo debido y así preservar los equipos, basa su trabajo en las leyes termodinámicas, el estudio de las torres de enfriamiento y sus equipos, él llegó a la conclusión que las torres con rutinas de mantenimiento y tratamientos físico-químicos del agua inadecuados, comúnmente operan muy por debajo de su capacidad de diseño, mientras que con un régimen básico de mantenimiento se puede maximizar la eficiencia energética de la torre y del sistema, apor to métodos para hacer un mantenimiento integral de las torres de enfriamiento así como su correcto uso y funcionamiento, también ayudo a conocer los fenómenos termodinámicos que ahí se presentan.

Así mismo, Merino, L(2015), en su trabajo de grado titulado: **“Diseño e Implementación de un Sistema de Control para la Torre de Enfriamiento del Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela Politécnica Nacional”** Presentado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional (Quito, Ecuador) tuvo como propósito el conocimiento sobre las variables que afectan el funcionamiento de una torre de enfriamiento para luego implementarle un sistema de control automatizado para la misma, el cual abarca sensores digitales, el diseño e implementación de una interfaz gráfica que permita al usuario controlar y monitorear al módulo y el desarrollo de un algoritmo para el control de la temperatura, basa su trabajo en las leyes termodinámicas, el estudio de las torres de enfriamiento y sus equipos, así como de las teorías de control y automatización industrial y llego a la conclusión que aplicando la automatización a las torres de

enfriamiento no solo se mejora su rendimiento y funcionamiento sino que además permite que la torre pueda ser un mejor equipo didáctico ya que los fenómenos termodinámicos se pueden observar mejor y al controlarse los ventiladores se puede aumentar o bajar la temperatura ya que estos no giraran a temperatura constante si no que se podrán adaptar al flujo de aire que el sistema requiera, apor to fenómenos físicos, químicos y termodinámicos estudiados en ella para la realización de la automatización así como un planteamiento de mejora en materia de automatización.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Procesos de Transferencia de Calor

Y. Cengel (2007), señala que la Termodinámica Y Transferencia de Calor: Con base en la experiencia, se sabe que una bebida enlatada fría dejada en una habitación se entibia y una bebida enlatada tibia que se deja en un refrigerador se enfría. Esto se lleva a cabo por la transferencia de energía del medio caliente hacia el frío. La transferencia de energía siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y esa transferencia se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura. La energía existe en varias formas. En este texto se está interesado sobre todo en el calor, que es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la transferencia de calor.

Después de todo, se puede determinar la cantidad de transferencia de calor para cualquier sistema que pase por cualquier proceso, con la sola aplicación del análisis termodinámico. La razón es que la termodinámica se interesa en la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro, y no indica cuánto tiempo transcurrirá. Un análisis termodinámico sencillamente nos dice cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico con el fin de satisfacer el principio de conservación de la energía.

En la práctica tiene más interés la razón de la transferencia de calor (transferencia de calor por unidad de tiempo) que la cantidad de este último. Por ejemplo, es posible determinar la cantidad de calor transferida de una jarra o termo conforme el café caliente que está en su interior se enfría de 90°C hasta 80°C con sólo un análisis termodinámico. Pero a un usuario típico o al diseñador de una de estas jarras le interesa principalmente cuánto tiempo pasará antes de que el café caliente que esté en el interior se enfríe hasta 80°C, y un análisis termodinámico no puede responder esta pregunta. La determinación de las razones de transferencia del calor hacia un sistema y desde éste y, por tanto, los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, así como de la variación de la temperatura, son el tema de la transferencia de calor.

La termodinámica trata de los estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que falta el equilibrio térmico y, por tanto, existe un fenómeno de no equilibrio. Por lo tanto, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica. Sin embargo, las leyes de la termodinámica ponen la estructura para la ciencia de la transferencia de calor. En la primera ley se requiere que la razón de la transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la razón de incremento de la energía de ese sistema. En la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente. Esto se asemeja a un automóvil estacionado sobre un camino inclinado que debe moverse hacia abajo de la pendiente, en la dirección que decrezca la elevación, cuando se suelten sus frenos. También es análogo a la corriente eléctrica que fluye en la dirección de la menor tensión o al fluido que se mueve en la dirección que disminuye la presión total.

Existen dos procesos generales de transferencia de calor: Sin cambio de fase, conocida también como calor sensible y con cambio de fase. El proceso sin cambio de fase o calor sensible, como su nombre sugiere, involucra operaciones de calentamiento y enfriamiento de fluidos donde la transferencia de calor resulta solamente en cambios de temperatura; mientras que, en el cambio de fase, la operación

se traduce en una conversión de líquido a vapor o de vapor a líquido; es decir, vaporización o condensación. Muchas aplicaciones involucran ambos tipos de proceso.

2.2.1.1 Calor y temperatura

J. Conesa (2013), señala que la temperatura es una magnitud física que se refiere a la sensación de frío o caliente al tocar alguna sustancia. En cambio, el calor es una transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, producida por una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a otra de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la zona más fría y reduce la de la zona más cálida, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante. La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a otro de temperatura alta si no se realiza trabajo. La materia está formada por átomos o moléculas que están en constante movimiento, por lo tanto, tienen energía de posición o potencial y energía de movimiento o cinética. Los continuos choques entre los átomos o moléculas transforman parte de la energía cinética en calor, cambiando la temperatura del cuerpo.

2.2.1.2 Mecanismos de transferencia de calor

J. Conesa (2013), señala que los mecanismos de transferencia de calor son los siguientes:

Conducción: la conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor x , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$.

Convección: la convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección.

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = A (T_A - T) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2 K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T .

Radiación: la radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. (La trayectoria descrita por un fotón se llama rayo). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación

electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influido por la presencia de materia. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda\nu = c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío con una rapidez constante $c = 299792 \text{ km/s}$, llamada velocidad de la luz. Los fotones son emitidos o absorbidos por la materia. La longitud de onda de la radiación está relacionada con la energía de los fotones, por una ecuación desarrollada por Planck:

$$E = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde h se llama constante de Planck, su valor es $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ (Según, Cengel. 2006)

2.2.1.3 Conducción de calor en régimen transitorio

Y. Cengel (2007), señala que en general, la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo, así como con la posición. En coordenadas rectangulares, esta variación se expresa como $T(x, y, z, t)$, en donde (x, y, z) indica la variación en las direcciones xyz y t indica la variación con el tiempo. En el capítulo anterior se consideró la conducción de calor en condiciones estacionarias, para las cuales la temperatura de un cuerpo en cualquier punto no cambia con el tiempo. Con certeza, esto simplificó el análisis, en especial cuando la temperatura varió sólo en una dirección y se pudo obtener soluciones analíticas. En este capítulo se considera la variación de la temperatura con el tiempo,

así como con la posición, en sistemas unidimensionales y multidimensionales. (Según, Yunus. 2006)

Resistencia de Contacto

C. Romero (2005) señala que cuando superficies conductoras distintas se sitúan en contacto, aparece generalmente una resistencia térmica en la interfase de los sólidos. Esta resistencia, llamada resistencia de contacto, se desarrolla cuando los dos materiales no se ajustan exactamente y por ello entre ambos queda atrapada una delgada capa de fluido. A través de los puntos de contacto del sólido, el calor se transmite por conducción mientras que a través del fluido de la interfase el calor se transmite por convección y radiación.

La resistencia térmica se define como la relación entre el potencial de flujo a la correspondiente tasa de transferencia de calor y se puede expresar de la siguiente forma, considerando flujo unidimensional:

$$R = \frac{T}{q} \quad (Ec. 3)$$

Donde R es la resistencia térmica, T es la diferencia de temperatura entre el circuito y q es el calor transmitido en el circuito. La representación de circuitos proporciona una herramienta útil para conceptualizar y cuantificar los problemas de transferencia de calor. Las resistencias pueden asociarse dependiendo de su configuración; esto es conocido como resistencia equivalente. Cuando la configuración es en serie, la resistencia equivalente se obtiene al realizar las sumatorias de dichas resistencias.

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \quad (Ec. 4)$$

La resistencia se puede expresar por mecanismo de transferencia de calor dependiendo de su área:

Resistencia térmica de conducción para pared plana:

$$R_{t,conductiva} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (Ec. 5)$$

Resistencia térmica de convección:

$$R_{t,convectiva} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h_c A} \quad (Ec. 6)$$

Resistencia térmica de radiación.

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_\infty}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (Ec. 7)$$

Donde T_{s1} : es la temperatura de la superficie de la pared del lado caliente, T_{s2} : es la temperatura de la superficie de la pared del lado frío, q_x es el calor por conducción, L : es la longitud de la pared, k : es la conductividad térmica del material, A : es el área de la pared, T_s : es la temperatura de la superficie, T_∞ : es la temperatura del ambiente, h_c : es la h convectiva del material y h_r : es la h de radiación del material.

2.2.2 Intercambiadores de Calor

G. Linares (2001) señala que un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Son parte esencial de los dispositivos de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía, procesamientos químicos entre otros. Los intercambiadores son diseñados para satisfacer requerimientos específicos, existiendo en el mercado una gran diversidad de tipos que difieren en tamaño y forma. Estos tipos son clasificados de acuerdo a diferentes criterios, tales como procesos y mecanismos de transferencia de calor, grado de compactación de la superficie, patrón de flujo, número de fluidos, geometría y tipo de construcción. Este último criterio engloba un amplio rango de intercambiadores usados en la industria petrolera. (**Ver figura 1**).

Intercambiador de Calor Tubular en Forma de U

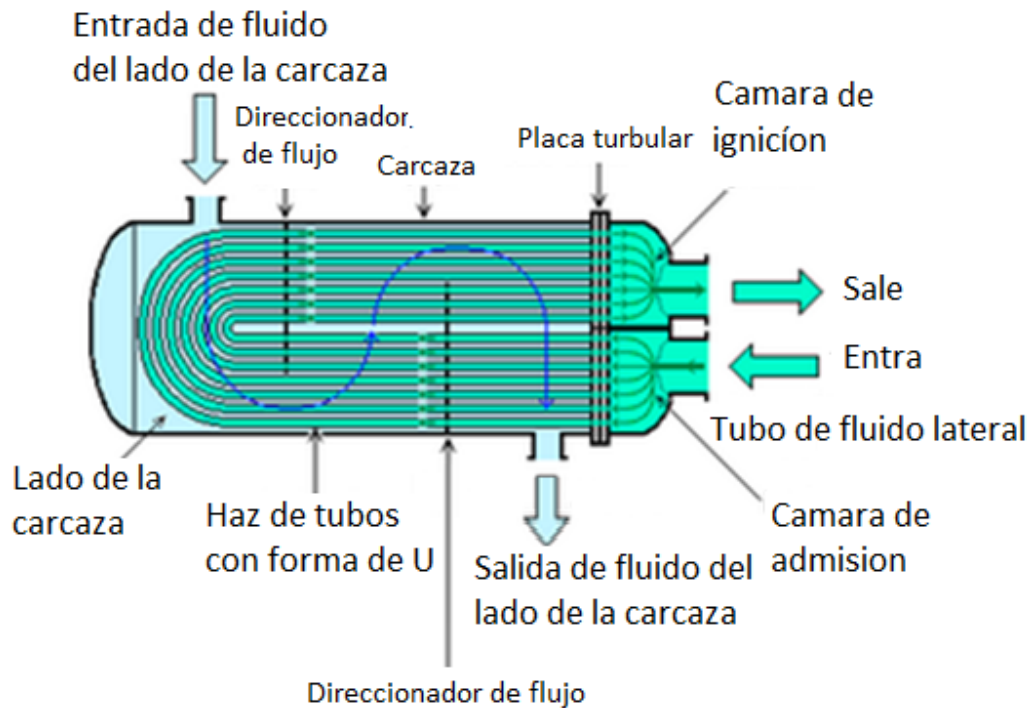


Figura 1. Intercambiador de calor.

Fuente: Linares (2001)

2.2.3 Tipos de Intercambiadores de Calor Según su aplicación

I. Cámara (2011), señala que los tipos de intercambiadores de calor según su aplicación son:

Refrigerador: Utiliza un refrigerante para enfriar un fluido hasta una temperatura menor que la obtenida si se utilizara agua o aire para enfriarla.

Condensador: Es una unidad en la cual los vapores de proceso se convierten total o parcialmente en líquidos. Generalmente se utiliza agua o aire como medio de enfriamiento. El término condensador de superficie se refiere específicamente a aquellas unidades de carcasa y tubos que se utilizan para la condensación del vapor de desecho, proveniente de las máquinas y de las turbinas a vapor. Un condensador de

contacto directo es una unidad en la cual el vapor es condensado mediante contacto con gotas de agua

Enfriador: unidad en la cual una corriente del proceso intercambia calor con agua o aire sin cambio de fase.

Calentador: Un calentador es un intercambiador de calor que aumenta la entalpía de una corriente, sin que normalmente ocurra un cambio de fase. Como fuente de calor se utiliza una corriente de servicio, la cual puede ser vapor de agua, aceite caliente, fluidos especiales para transferencia de calor ó una corriente de proceso de entalpía alta, por ejemplo, la descarga de un reactor operado a temperaturas elevada.

Evaporador: Los evaporadores son intercambiadores diseñados específicamente para aumentar la concentración de las soluciones acuosas mediante la evaporación de una parte del agua.

Vaporizador: Es un intercambiador que convierte líquido a vapor. El término vaporizador se refiere normalmente a aquellas unidades que manejan líquidos diferentes al agua.

Rehervidor: Es un vaporizador que suministra el calor latente de vaporización al fondo (generalmente) de una torre fraccionadora. Hay dos tipos generales de rehervidores, aquéllos que envían dos fases a la torre para separar el vapor del líquido y los que retornan vapor solamente. Los primeros pueden operar mediante circulación natural (comúnmente llamados termosifones) o circulación forzada.

Generadores de vapor: Son un tipo especial de vaporizadores usados para producir vapor de agua. Como fuente de calor se utiliza generalmente el calor en exceso que no se requiere para el proceso; de allí que a estos rehervidores se les llame comúnmente “Calderas de recuperación de calor”. Al igual que los rehervidores, los generadores de vapor pueden ser del tipo Kettle, de circulación forzada o termosifones.

Sobrecalentador: Un Sobrecalentador calienta el vapor por encima de su temperatura de saturación. En Teoría, el diseño de todos estos equipos es parecido, sin embargo, los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor difieren unos de

otros. Por ejemplo, hay que considerar si existe o no cambio de fase, el régimen de flujo, si el fluido es multicomponente, etc.

2.2.4 Función de los Intercambiadores de Calor

I. Cámara (2011), señala que la función básica de los intercambiadores es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. El calor fluye como resultado del gradiente de temperatura desde el fluido caliente hacia el frío, a través de una pared de separación, a la cual se le denomina superficie o área de transferencia de calor. Es decir, no existe fuente de energía térmica en un intercambiador de calor. Por otro lado, si los fluidos son inmiscibles, el área física de transferencia de calor puede ser eliminada, y la interfase formada entre los fluidos puede servir como área de transferencia de calor.

2.2.5 Proceso de Refrigeración

N. Paguay, J. Paredes & A. Quisintuña (2012) señalan que la refrigeración es un aspecto especial a la transferencia de calor y comprende la producción y utilización de temperatura por debajo de la atmosférica mediante varios procesos prácticos. Las sustancias se enfrían cuando se transfiere su calor, por una caída de temperatura, hacia medios sólidos, líquidos o gaseosos que están natural o artificialmente más fríos, originándose una temperatura más baja a partir de la radiación, efectos físicos de calor sensible o latente o por efectos químicos endotérmicos, termoeléctricos o incluso magnéticos.

2.2.6 Proceso de Condensación

N. Paguay, J. Paredes & A. Quisintuña (2012) señalan que la condensación es el cambio en la materia de una sustancia a una fase más densa, como por ejemplo de gas (o vapor) a líquido. La condensación generalmente ocurre cuando un vapor se enfría, pero también puede ocurrir si se comprime (es decir, si se aumenta la presión) o se somete a una combinación de refrigeración y compresión. Al vapor que ha sido condensado de un líquido se le llama condensado. El dispositivo o la unidad donde se condensan los vapores en el líquido se llama condensador. Los condensadores se usan en intercambiadores de calor que tienen diversos diseños y tamaños.

2.2.7 Procesos de Enfriamiento del Agua

G. Manzano (2017), señala que los procesos de enfriamiento del agua se cuentan entre lo más antiguos que haya desarrollado el hombre. Por lo común el agua se enfría exponiendo la superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, como el enfriamiento del agua en la superficie de un estanque, otros son comparativamente rápidos, por ejemplo, el rociado de agua hacia el aire, todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire en diferentes grados. Tanto el agua como el aire son sustancias de bajo costo y cuando hay que enfriar grandes volúmenes, como sucede en las mayorías de las operaciones de enfriamiento de agua es fundamental que tanto el equipo como las operaciones para disminuir la temperatura del agua sean de bajo costo.

2.2.8 Torre de enfriamiento

G. Manzano (2017), señala que una torre de enfriamiento es un dispositivo o sistema en el cual aire y agua están en íntimo contacto. El enfriamiento se logra principalmente a través de evaporación. El agua al ser enfriada es distribuida en la torre por medio de canales la cual fluye por gravedad a través de aspersores o boquillas, éstas exponen una gran superficie de agua a la acción del aire atmosférico. La circulación del aire atmosférico se logra por medio de ventiladores ubicados en la parte superior de las torres.

El proceso de termo transferencia que se produce en una torre para enfriamiento de agua, cualquiera fuese su tipo, es el resultado de la interacción entre el medio gaseoso refrigerante (aire) y el fluido a enfriar (agua). En las torres el agua se encuentra en contacto directo con el aire que la enfría y el proceso de transferencia de calor se realiza en parte por intercambio de calor sensible entre la fase líquida y la gaseosa, pero en mayor medida por la formación de vapor de agua en la interfase líquido/gas y su posterior difusión en el aire que la circunda.

2.2.9 Tipos de torres de enfriamiento

G. Manzano (2017), señala que las torres de enfriamiento se pueden clasificar según la forma de suministro de aire en:

2.2.9.1 Torres de circulación natural

Atmosféricas: El movimiento del aire depende del viento y ricas del efecto aspirante de las boquillas aspersores. Se usan en pequeñas instalaciones. Depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire.

Tiro natural: El flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado. Debido al inmenso tamaño de estas torres (152,4 metros de alto y 121,92 metros de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 757.082 L Son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas. (Ver Figura 2).

3 Torres de tiro mecánico: El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersores o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios, (Ver Figura 3). El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas de la torre siguientes:

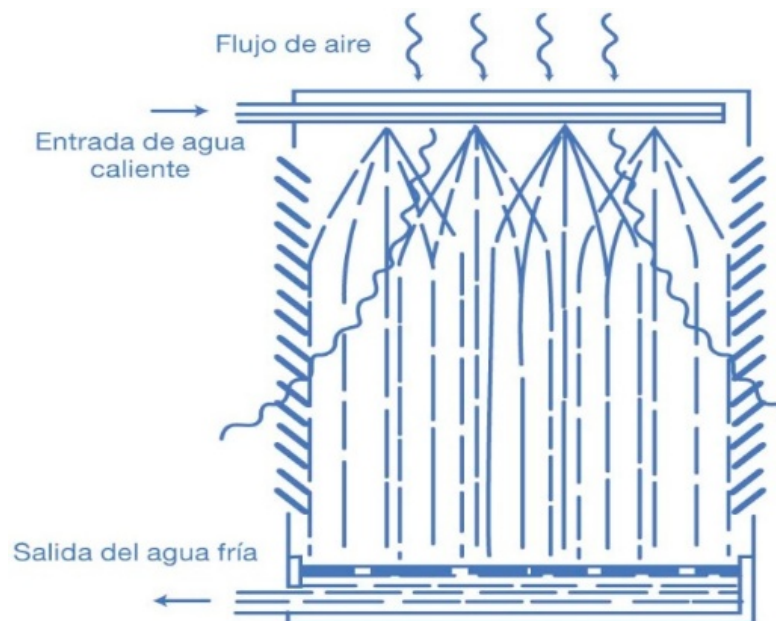


Figura 2. Torre de enfriamiento de circulación natural.

Fuente: Rivera (2016).

4 Tiro Inducido: El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Son las más utilizadas.

5 Tiro forzado: El aire se fuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior. Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre. El tiro inducido con el ventilador en la parte superior de la torre evita esto y además permite una distribución interna más uniforme del aire. El balance de masas que se puede realizar en una torre de enfriamiento es el siguiente:

$$Mw1 + (Ma \times X1) = Mw2 + (Ma \times X2) \quad (Ec. 8)$$

Donde $Mw1$: flujo másico del agua en la entrada, $Mw2$: flujo másico del agua en la salida, $X1$: humedad relativa al ingreso del aire, $X2$: humedad relativa a la salida del aire, Ma : masa del aire. Y el balance de energía es el siguiente:

$$(Mw1 \times w1) + (Ma \times h1) = (Mw2 \times w2) + (Ma \times h2) \quad (Ec. 9)$$

Donde: $h1$: es la entalpia del aire, $hw1$: entalpia del agua a la entrada y $hw2$: entalpia del agua a la salida.

6 Torres de flujo: Las torres de flujo cruzado reemplazaron a las de contraflujo en muchas aplicaciones, debido a que permiten la entrada de aire en forma horizontal, el cual choca contra el relleno, disminuyendo notablemente la caída de presión del lado del aire, lo que permite que en un mismo volumen empacado se introduzca mucho más aire y que, en consecuencia, se obtenga mayor potencia para mover los ventiladores; visto en otra forma, que en el flujo cruzado se puedan diseñar celdas más grandes con baja potencia en los ventiladores. (Ver figuras 4 y 5).

7 Torre por contacto con el aire: Las torres abiertas funcionan por el principio de enfriamiento evaporativo por contacto directo del aire con el agua a enfriar, mientras que las cerradas funcionan por transmisión de calor a través de una superficie que

separa el fluido a refrigerar del aire ambiente, generalmente se trata de un serpentín. (Ver figura 6).

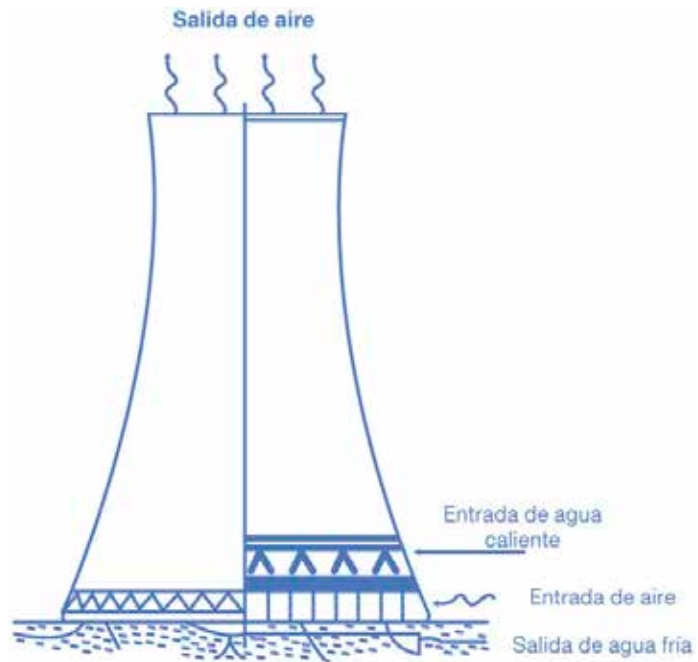


Figura 3. Torre de tiro mecánico.

Fuente: Rivera (2016).

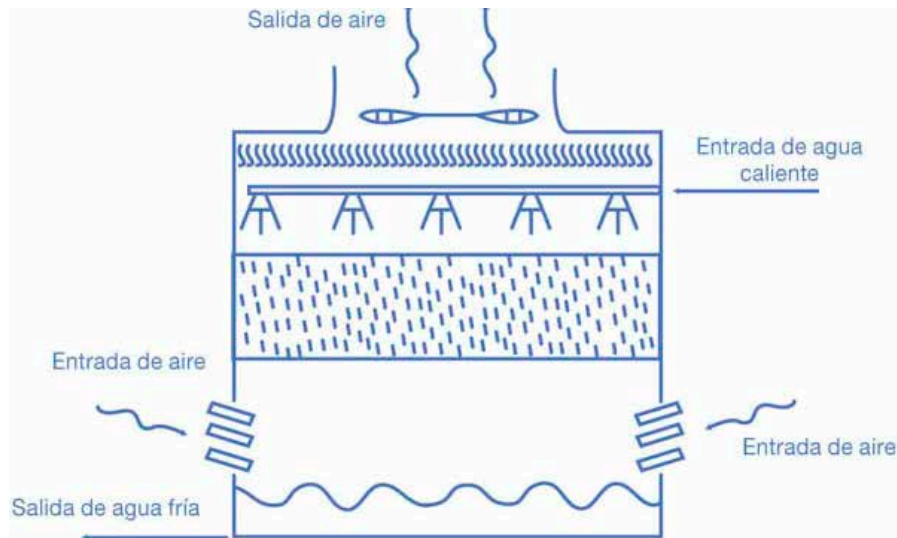


Figura 4. Torre de enfriamiento a contraflujo.

Fuente: Rivera (2016).

2.2.9.2 Componentes Básicos de las Torres de Enfriamiento

G. Manzano (2017), señala que los componentes básicos de una torre de enfriamiento son los siguientes:

Sistema de distribución de agua: Hace referencia a la manera como se vierte el agua sobre la torre. Existen dos tipos de sistemas, uno que opera por gravedad y otro por presión. El primero se compone de un recipiente y unos agujeros que distribuyen el agua; tiene bajos costos de operación debido a la poca potencia de bombeo que requiere y es de fácil mantenimiento. Sin embargo, no se usa en torres que operen a contraflujo debido a las dificultades que presentan en la distribución uniforme del agua. El segundo se compone de sistemas de pulverización con toberas orientadas hacia abajo que pueden ser en forma de espina de pescado o rotativas. Brindan mayor rendimiento al sistema, pero su mantenimiento es más frecuente, y los consumos energéticos son mayores. (Ver Figura 7).

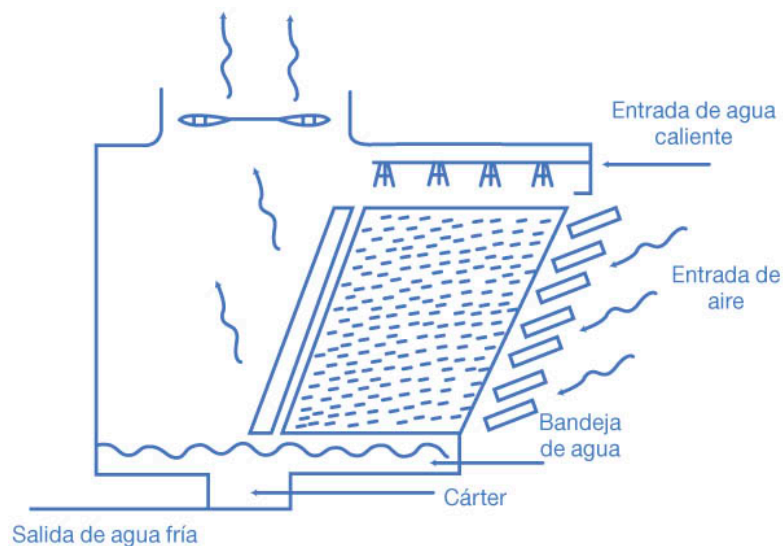


Figura 5. Torre de enfriamiento de flujo cruzado.

Fuente: Rivera (2016).

Relleno: Es el material empacado que tiene la torre en su interior, su finalidad es brindar mayor tiempo y área de contacto del aire con el agua. El relleno

debe provocar poca resistencia al paso de aire y mantener una distribución uniforme del agua durante todo su recorrido. Pueden diferenciarse dos tipos de relleno: de goteo y de película o laminares. En los rellenos de goteo las gotas de agua caen sobre una serie de pisos superpuestos que van haciendo la gota cada vez más pequeña. Puede presentar arrastre de gotas, por lo que se recomienda el uso de eliminadores de goteo. Los rellenos laminares proporcionan mayor capacidad de enfriamiento, son más eficientes y no producen tanto goteo al exterior del equipo, sin embargo, requiere un mantenimiento más frecuente, Estos pisos o parrillas pueden ser de madera o de plástico (polipropileno), las cuales tienen rigidez y consistencia lo que les permite ser auto soportantes.

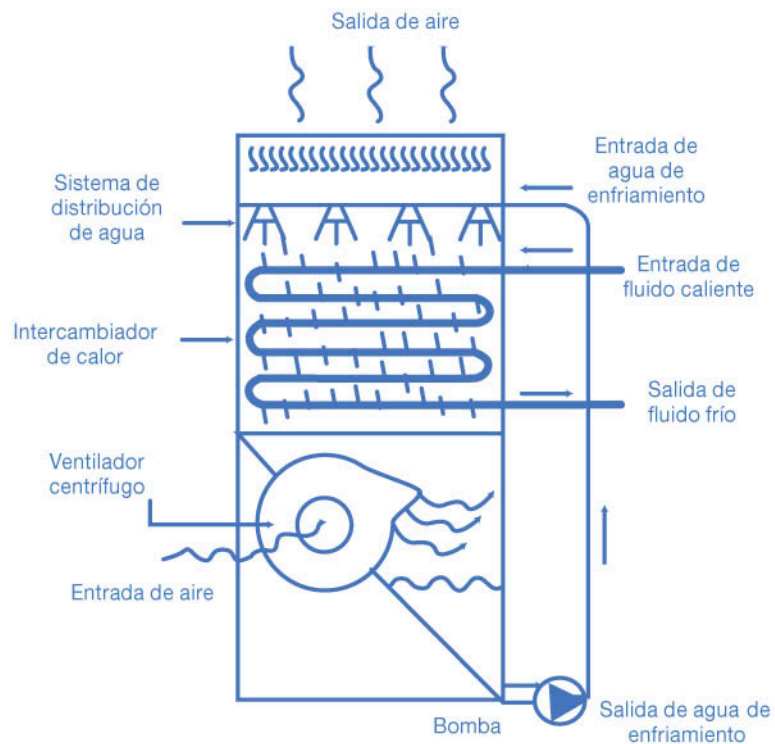


Figura 6. Torre de enfriamiento Abierta.

Fuente: Rivera (2016)

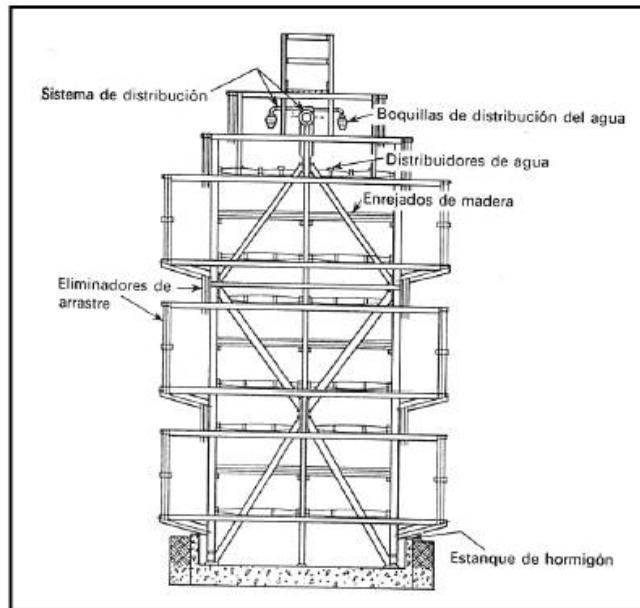


Figura 7. Sistema de Distribución de agua, Torre de enfriamiento.

Fuente: Flores (2015)

8Eliminadores de gotas: Es un sistema compuesto de rejillas o deflectores que va colocado por encima del sistema de distribución y aspersion de agua, los eliminadores básicamente retienen las gotas de agua arrastradas por el aire que salen de la torre. Redireccionan el flujo y separan las gotas del aire, haciéndolas caer de nuevo sobre el relleno, tienen dos efectos positivos; el primero es reducir la reposición del agua y el segundo evitar la formación de ambientes saturados que puedan afectar las torres adyacentes. **(Ver figura 9).**

9Chimeneas: Se emplean en torres de tiro inducido para mejorar el comportamiento del ventilador y evitar efectos de recirculación de aire, son fabricadas con materiales resistentes a la acción corrosiva del agua, sujetadas entre sí por anillos tensores. En las torres de madera la función de la chimenea es realizada por el tambor o cilindro protector del ventilador. **(Ver figura 8).**

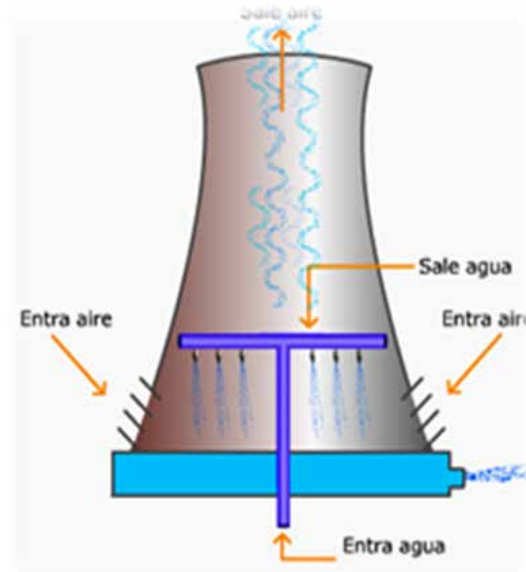


Figura 8. Chimenea de Torre de enfriamiento.

Fuente: Flores (2015)

10 Ventiladores: En las torres de enfriamiento se utilizan dos tipos de ventiladores: Axiales para torres de tiro forzado e inducido y centrífugos para torres de tiro forzado. Los ventiladores axiales son apropiados para mover grandes volúmenes de aire y tienen mayores aplicaciones en equipos industriales grandes. Los ventiladores centrífugos son adecuados para impulsar caudales relativamente pequeños con mayores caídas de presión. (Ver figura 10).

En los ventiladores axiales, el movimiento del flujo a través del rotor, con álabes o palas de distintas formas, se realiza conservando la dirección del eje de éste. Se usan para mover grandes cantidades de aire en espacios abiertos; como la resistencia al flujo es muy baja, se requiere generar una presión estática pequeña, del orden de los **5 a 25mm** de columna de agua. Debido a esto, la principal aplicación de los ventiladores axiales se encuentra en el campo de la ventilación general y se los conoce con el nombre de extractores o inyectores de aire. Sin embargo, este tipo de ventiladores, cuando se los construye con álabes en forma de perfil de ala y de paso

variable, llegan a generar alturas de presión estáticas del orden de los **300mm** de columna de agua y se los usa en aplicaciones diversa.

La velocidad de lineal de un ventilador se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$Va = Wa \times r \quad (Ec. 11)$$

Donde la **Va**: es la velocidad lineal del ventilador, **Wa**: velocidad de rotación del ventilador y **r** el radio del ventilador. **A** su vez el área transversal de un ventilador se calcula según la ecuación:

$$Av = \pi \times r^2 \quad (Ec. 12)$$

Donde **Av**: es el área transversal del ventilador, **r**: es el radio del ventilador y π es la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro en geometría. Es un número irracional y una de las constantes matemáticas más importantes. Se emplea frecuentemente en matemáticas, física e ingeniería.



Figura 9. Componentes Torre de enfriamiento.

Fuente: Flores (2015).

11 Bombas: Las bombas reciben el agua del proceso y alimentan la torre. Consumen una fracción importante de la potencia requerida en todo el sistema. Cuando se trata de instalaciones grandes debe haber una bomba en reposo que pueda entrar en operación para efectos de mantenimiento o reparación de las otras.

12 Control: En la mayoría de los sistemas de torres de enfriamiento basta con un control de nivel en la piscina de agua que controla la entrada de la reposición.

13 Recubrimiento Exterior: El recubrimiento exterior de todas las torres se realiza mediante placas onduladas, solapadas entre sí y sujetas a la propia estructura de la torre mediante anclajes especiales galvanizados. El material de las placas se especifica según diseño de ingeniería.

14 Separación entre Celdas: Las distintas celdas que integran una torre son separadas mediante placas planas u onduladas, sujetas entre sí y a la estructura con pletinas galvanizadas.

15 Entradas de Aire (Deflectores): Estas son placas planas, resistentes a la acción erosiva del agua, las cuales son fijadas en la parte inferior de los laterales de mayor longitud que quedan al descubierto. Estos deflectores son colocados formando ángulo con los brazos horizontales de la torre a fin de que canalicen el flujo de aire al interior e impidan el goteo del agua fuera de ésta. El material de las placas se especifica según diseño de ingeniería.

16 Sistema de Distribución de agua caliente: El sistema distribuidor de agua está formado por un colector principal de forma telescópica y en secciones variables, del cual salen ramales laterales donde están conectados los aspersores o toberas de tipo multicono. En las torres fabricadas de madera el sistema de distribución del agua caliente consiste en una caja de distribución generalmente de bronce conectada a la tubería principal de alimentación, en dicha caja se encuentran conectadas las toberas o boquillas de rociado que distribuyen el agua en la celda.

17 Estanque de Recolección de Agua Fría: Es la parte inferior de la torre donde se deposita el agua que ha sido enfriada, y de allí circulará de nuevo por los

diferentes sistemas de enfriamiento. Generalmente este depósito es fabricado de concreto, pero en algunos casos puede ser de madera o metal.

18 Soporte del Equipo Mecánico: El equipo mecánico está instalado sobre un chasis, que se fija a la propia estructura de la torre mediante pernos y abrazaderas de sujeción. El equipo está compuesto por los siguientes elementos: motor de accionamiento, eje de transmisión, caja reductora, ventilador e interruptor de seguridad.

19 Accesos: Según el tipo de torre de enfriamiento, ésta estará provista de escaleras y barandillas de madera o metal. Las torres fabricadas de hormigón armado tienen entrada al interior de éstas, la cual está ubicada generalmente en la parte superior, y por medio de escalerillas metálicas se desciende hasta el sistema de distribución a través de los eliminadores de gota.

2.2.9.3 Funcionamiento de una Torre de Enfriamiento

G. Manzano (2017), señala que el agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura menor a la temperatura del agua, en estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación), originando que la temperatura del aire y su humedad aumenten y que la temperatura del agua descienda; la temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura del aire a la entrada de la torre. Parte del agua que se evapora, causa la emisión de más calor, por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de enfriamiento.

Para crear flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador. Estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. Además, en el interior de las torres se monta un empaque con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que la enfría.

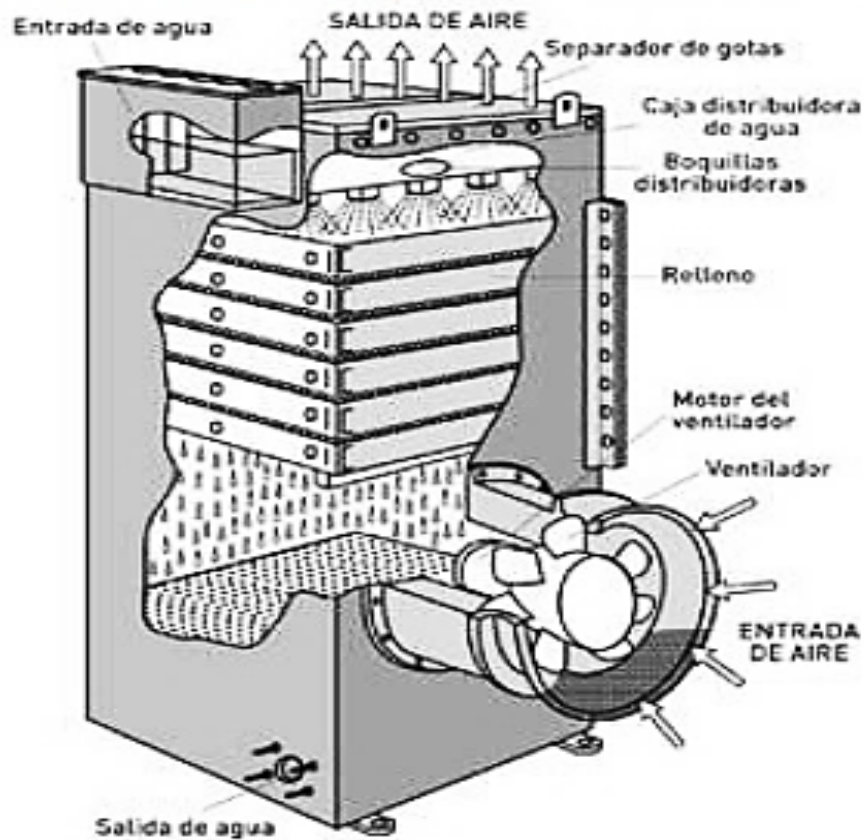


Figura 10. Componentes de torre de enfriamiento.

Fuente: Romero (2012)

2.2.10 Recirculación

D. Ghislieri (2000), señala que la recirculación en las torres de enfriamiento se define como una adulteración de la atmósfera de entrada a la torre por la atmósfera de salida de la misma. El efecto de la recirculación se ve en un inesperado aumento de la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento (por encima de la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente), y un correspondiente incremento en la temperatura del agua que sale de la torre.

2.2.11 Restricción del flujo de Aire

E. Rivera (2016), señala que una determinada carga de calor, un flujo determinado de agua y una temperatura de bulbo húmedo particular la temperatura del

agua fría producida por una torre de enfriamiento es totalmente dependiente de la cantidad de aire de entrada. Una disminución en la cantidad de aire y la temperatura del agua se incrementará. Debido a la importancia del flujo de aire, los fabricantes se preocupan en diseñar correctamente los ventiladores y sus motores, puesto que estos son los que mueven el aire contra la presión estática encontrada dentro de la torre.

2.2.12 Viento

E. Rivera (2016), señala que el viento dependiendo de su velocidad y dirección, tiende a incrementar el potencial de la torre de enfriamiento a la recirculación. No solamente la curvatura creada por el aire de salida en la dirección del flujo del viento, también se crea una zona de baja presión en la cual puede formarse una porción de niebla, si la admisión de aire a la torre está en esa dirección, entonces puede contaminarse el aire de entrada con esa niebla. El grado al cual puede afectar la dirección del viento aumenta dependiendo de la relación de la velocidad de descarga de la torre (V_j) respecto a la velocidad del viento (V_a), (**Ver figuras 11 y 12**).

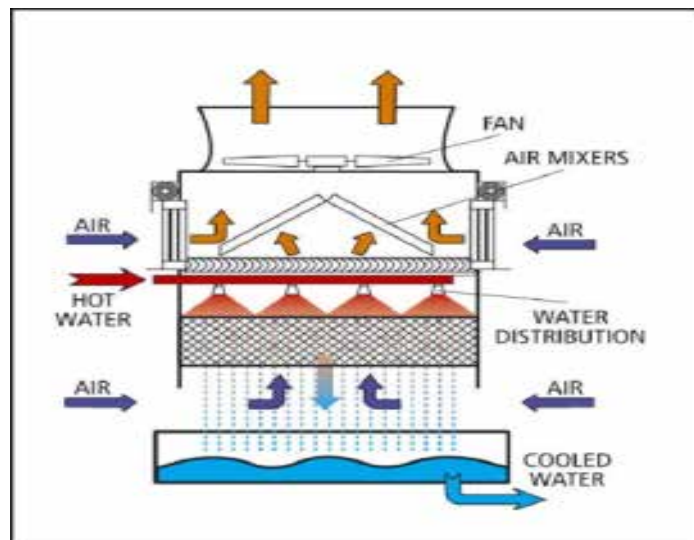


Figura 11. Ejemplo de Funcionamiento de una Torre de enfriamiento.

Fuente: Mulyandasari (2011).

2.2.13 Interferencia

E. Rivera (2016), señala que los sumideros de calor ubicados cerca de una torre de enfriamiento pueden interferir con el desempeño térmico de la misma. Estas

interferencias pueden ser causadas por otras instalaciones de la planta u otros equipos. Muchas veces consisten de contribución térmica del efluente de otra torre de enfriamiento cercana.

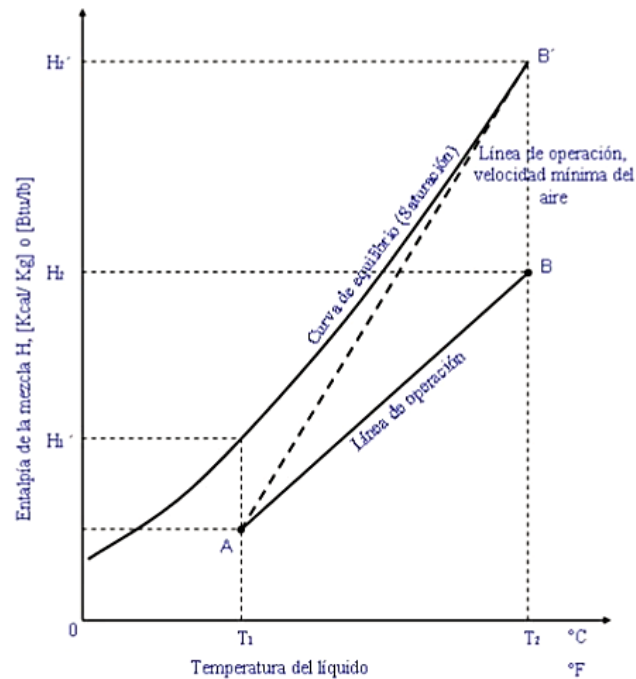


Figura 12. Grafica de operación de torre de enfriamiento.

Fuente: Mulyandasari (2011).

2.2.14 Ciclos Térmicos

Y. Cengel (2012), señala que las máquinas térmicas son dispositivos cíclicos y por ende son usados en diferentes ciclos con diferentes propósitos, por ende, las torres de enfriamiento y otros maquinas térmicas como las calderas o las turbinas son usadas frecuentemente. Durante una parte de dichos ciclos el fluido realiza trabajo y durante otra se hace trabajo sobre el fluido. La diferencia entre estos dos trabajos es el trabajo neto que se entrega, la eficiencia del ciclo de una máquina térmica depende en gran medida de cómo se ejecute cada uno de los procesos que constituyen el ciclo, entre los ciclos más importantes tenemos:

2.2.15 Ciclo Carnot

Y. Cengel (2012), señala que es probable que el ciclo térmico más conocido sea el ciclo de Carnot, propuesto en 1824 por el ingeniero francés Sadi Carnot. La máquina térmica teórica que opera en el ciclo de Carnot se llama máquina térmica de Carnot, cuyo ciclo se compone de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos, y que es posible llevar a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario. Considere un sistema cerrado conformado por un gas contenido en un dispositivo de cilindro-émbolo adiabático (**Ver figura 13**). El aislamiento de la cabeza del cilindro es tal que puede ser eliminado para poner al cilindro en contacto con depósitos que proporcionan transferencia de calor. Los cuatro procesos reversibles que conforman el ciclo de Carnot son los siguientes:

Expansión isotérmica reversible (**proceso 1-2, T_H constante**): Inicialmente (**estado 1**), la temperatura del gas es T_H y la cabeza del cilindro está en contacto estrecho con una fuente a temperatura T_H . Se permite que el gas se expanda lentamente y que realice trabajo sobre los alrededores. Cuando el gas se expande su temperatura tiende a disminuir, pero tan pronto como disminuye la temperatura en una cantidad infinitesimal dT , cierta cantidad de calor se transfiere del depósito hacia el gas, de modo que la temperatura de éste se eleva a T_H . Así, la temperatura del gas se mantiene constante en T_H . Como la diferencia de temperatura entre el gas y el depósito nunca excede una cantidad diferencial dT , éste es un proceso reversible de transferencia de calor. El proceso continúa hasta que el émbolo alcanza la posición 2. La cantidad de calor total transferido al gas durante este proceso es Q_H .

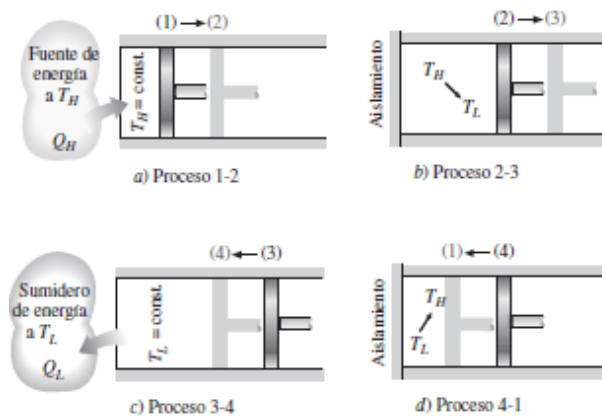


Figura 13. Representación gráfica de un ciclo de Carnot.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017).

Expansión adiabática reversible (**proceso 2-3, la temperatura disminuye de T_H a T_L**): en el **estado 2**, el depósito que estuvo en contacto con la cabeza del cilindro se elimina y se reemplaza por aislamiento para que el sistema se vuelva adiabático. El gas continúa expandiéndose lentamente y realiza trabajo sobre los alrededores hasta que su temperatura disminuye de T_H a T_L (**estado 3**). Se supone que el émbolo no experimenta fricción y el proceso está en cuasi equilibrio, de modo que el proceso es reversible, así como adiabático.

Compresión isotérmica reversible (**proceso 3-4, T_L constante**). En el **estado 3**, se retira el aislamiento de la cabeza del cilindro y se pone a éste en contacto con un sumidero a temperatura T_L . Después una fuerza externa empuja al cilindro hacia el interior, de modo que se realiza trabajo sobre el gas. A medida que el gas se comprime, su temperatura tiende a incrementarse, pero tan pronto como aumenta una cantidad infinitesimal dT , el calor se transfiere desde el gas hacia el sumidero, lo que causa que la temperatura del gas descienda a T_L . Así, la temperatura del gas permanece constante en T_L . Como la diferencia de temperatura entre el gas y el sumidero nunca excede una cantidad diferencial dT , éste es un proceso de transferencia de calor reversible, el cual continúa hasta que el émbolo alcanza el **estado 4**. La cantidad de calor rechazado del gas durante este proceso es Q_L , (**Ver figura 14**).

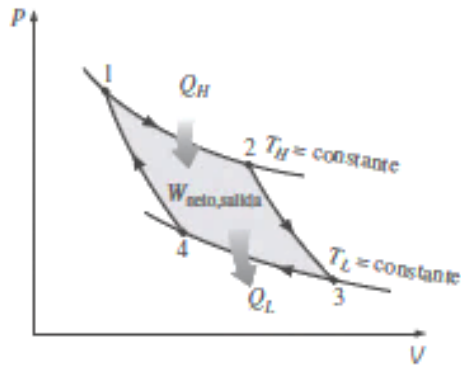


Figura 14. Diagrama P-V de un ciclo de Carnot.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017).

La anterior mente mencionada maquina térmica de Carnot que es una hipotética máquina que opera en el ciclo reversible de Carnot. La eficiencia térmica de cualquier máquina térmica, reversible o irreversible, se determina mediante la ecuación 13:

$$carnot = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (Ec. 13)$$

Donde Q_H es el calor transferido hacia la máquina térmica desde un depósito a temperatura alta a T_H , y Q_L es el calor rechazado hacia un depósito de temperatura baja a T_L . Para máquinas térmicas reversibles, la relación de transferencia de calor en la relación anterior se puede reemplazar por la de temperaturas absolutas de los dos depósitos, según la expresión de la ecuación 14:

$$\left(\frac{Q_l}{Q_h}\right)_{rev} = \frac{T_L}{T_H} \quad (Ec. 14)$$

Entonces la eficiencia de una máquina de Carnot, o de cualquier máquina térmica reversible, se convierte en:

$$carnot\ reversible = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (Ec. 15)$$

Esta relación se denomina eficiencia de Carnot porque la máquina térmica de Carnot es la máquina reversible mejor conocida. Ésta es la eficiencia máxima que puede tener una máquina térmica que opera entre los dos depósitos de energía térmica a temperaturas T_L y T_H (Ver figura 15). Todas las máquinas térmicas irreversibles (es decir, reales) que operan entre estos límites de temperatura (T_L y T_H) tienen eficiencias menores. Una máquina térmica real no puede alcanzar esta máxima eficiencia teórica porque es imposible eliminar por completo las irreversibilidades relacionadas con el ciclo real. Observe que T_L y T_H en la ecuación 5 son temperaturas absolutas. Si se utiliza $^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$ para las temperaturas en esta relación se obtienen resultados con mucho error. Las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se comparan. (Ver figura 16)

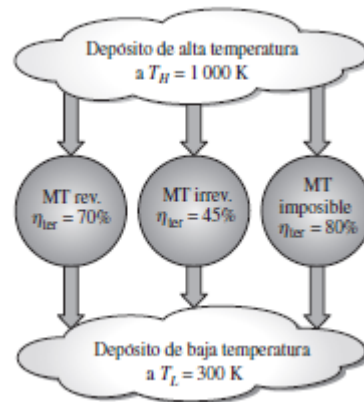


Figura 15. Comparación de eficiencias de una máquina de Carnot.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017).

$$\eta_{Carnot} \left\{ \begin{array}{l} < \eta_{Carnot\ rev} & \text{máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{Carnot\ rev} & \text{máquina térmica reversible} \\ > \eta_{Carnot\ rev} & \text{máquina térmica imposible} \end{array} \right\}$$

Figura 16. Diagrama de eficiencia de Carnot.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017)

La mayor parte de los dispositivos que producen trabajo (máquinas térmicas) utilizados en la actualidad tienen eficiencias menores a 40 por ciento, lo cual parece bajo en comparación con el 100 por ciento. Sin embargo, cuando se evalúa el desempeño de las máquinas térmicas reales, las eficiencias no deben compararse con el 100 por ciento, sino con la eficiencia de una máquina térmica reversible que opera entre los mismos límites de temperatura, porque éste es el límite superior teórico para la eficiencia, no el 100 por ciento.

2.2.16 Ciclo Rankine

Y. Cengel (2012), señala que el ciclo Rankine es un ciclo que opera con vapor, y es el que se utiliza en las centrales termoeléctricas. Consiste en calentar agua en una caldera hasta evaporarla y elevar la presión del vapor. Éste será llevado a una turbina donde produce energía cinética a costa de perder presión. Su camino continúa al seguir hacia un condensador donde lo que queda de vapor pasa a estado líquido para poder entrar a una bomba que le subirá la presión para nuevamente poder introducirlo a la caldera.

Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en la caldera y condensado por completo en el condensador, como se muestra de manera esquemática en un diagrama $T-s$ (Ver **figura 17**). Lo que resulta es el ciclo Rankine, el cual es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. El ciclo Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. (Ver figura 18). La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica

debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua. La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama $T-s$ se exagera de manera considerable para mayor claridad.

El agua entra a la caldera como líquido comprimido en el **estado 2** y sale como vapor sobrecalentado en el **estado 3**. La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes, se transfiere al agua esencialmente a presión constante. La caldera, junto con la sección (Sobrecalentador) donde el vapor se sobrecalienta, recibe el nombre de generador de vapor. El vapor sobre calentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado el vapor es por lo general un vapor húmedo con una alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor, rechazando el calor hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo.

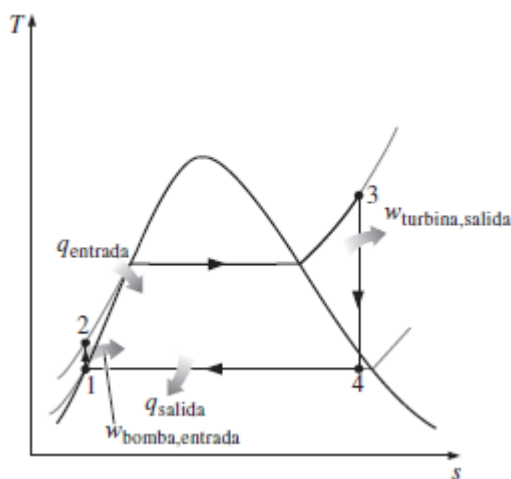


Figura 17. Diagrama T-s de un ciclo Rankine.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017).

En áreas donde el agua es muy valiosa, las centrales eléctricas son enfriadas con aire en lugar de agua. Este método de enfriamiento, que también se emplea en motores de automóvil, es conocido como enfriamiento seco. Varias centrales eléctricas en el mundo, incluidas algunas en Estados Unidos, utilizan enfriamiento seco para conservar el agua.

El área bajo la curva del proceso en un diagrama T-s representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles; y observe que el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido hacia el agua en la caldera y que el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estas dos es el trabajo neto producido durante el ciclo.

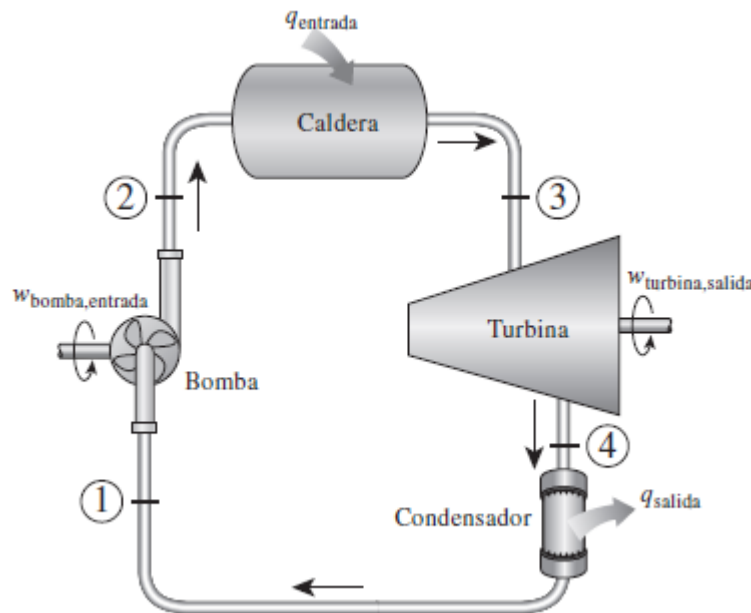


Figura 18. Diagrama de un ciclo Rankine.

Fuente: Yunus Cengel de Termodinámica (2017).

Los cuatro componentes asociados con el ciclo Rankine son la bomba, la caldera, la turbina y el condensador (Torre de enfriamiento) son dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto, los cuatro procesos que conforman el ciclo Rankine pueden ser analizados como procesos de flujo estacionario. Por lo general, los cambios en la

energía cinética y potencial del vapor son pequeños en relación con los términos de trabajo y de transferencia de calor, de manera que son insignificantes. Entonces, la ecuación de energía de flujo estacionario por unidad de masa de vapor se reduce a la ecuación 16:

Bomba (Q=0)

$$(Q_{Entrada} - Q_{Salida}) + (W_{Entrada} - W_{Salida}) = s \quad e \quad (Ec. 16)$$

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo y se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo puede expresarse como:

$$(W_{Bomba, entrada}) = 2 \quad 1 \quad (Ec. 17)$$

$$(W_{Bomba, entrada}) = v(P2 - P1) \quad (Ec. 18)$$

0

$$h_1 = h_f + v_{f1} \quad y \quad V_1 = v_{f1} a_{p1} \quad (Ec. 19)$$

Donde con caldera (w=0):

$$(Q_{Entrada}) = 3 \quad 2 \quad (Ec. 20)$$

Turbina (q=0):

$$(W_{Turbina, salida}) = 3 \quad 4 \quad (Ec. 21)$$

Condensador (w=0):

$$(Q_{Salida}) = 4 \quad 1 \quad (Ec. 22)$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a partir de:

$$\eta_{ter} = \frac{W_{Neto}}{Q_{Entrada}} = 1 - \frac{Q_{Salida}}{Q_{Entrada}} \quad (Ec. 23)$$

$$W_{Neto} = Q_{Entrada} - Q_{Salida} = (W_{Turbina, salida}) - (W_{Bomba, Entrada}) \quad (Ec. 24)$$

2.2.17 Sistemas de tuberías

Al ser las torres de enfriamiento dispositivos o sistemas en el cual el aire y el agua están contacto se necesita un flujo de agua constante fluyendo para llegar a la torre para atravesar la misma y salir de esta, para esto se debe hacer un estudio de todos los elementos que depende el fluido para hacer esto, que son el fluido en sí, las tuberías en las que se desplaza ese fluido y el aparato impulsor del fluido si lo necesitase.

Los atributos más relevantes que se estudiarán a continuación son el flujo en conductos con distintas velocidades, distintos fluidos y distintas geometrías. Los sistemas de tuberías son las formas más útiles de transportar fluidos y por eso se encuentran en casi cualquier diseño ingenieril con esto en mente, han sido estudiados extensamente.

2.2.18 Características Física del agua

Portal Educativo (2010), señala que el agua pura es un líquido insípido (no tiene sabor), incoloro (no tiene color) e inodoro (no tiene olor). El agua que se utiliza en las torres no suele tener disueltas otras sustancias, que no sean químicos para mejorar su limpieza.

Podemos encontrar el agua en tres estados diferentes:

Sólido

Líquido

Gaseoso

Los cambios de estado se producen cuando el agua pasa de un estado a otro al calentarse o enfriarse.

Pasa al estado sólido (hielo) si se encuentra a 0° o menor

Se mantiene en estado líquido (agua) entre 0° y 100°

Pasa al estado gaseoso (vapor de agua) a partir de los 100°

Punto de fusión: Es la temperatura a la cual coexisten en equilibrio la fase sólida y líquida a 1 atmósfera de presión. Para el agua, el valor del punto de fusión es **0°C**.

Caudal de agua o de un fluido: El cálculo del caudal de un fluido viene expresado por la ecuación de continuidad:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde Q: es el caudal (**m³/s**), V: es la velocidad (**m/s**) y A: es el área de la sección transversal de la tubería (**m²**).

Densidad: Su densidad es de **1 g/cm³**, es decir, 1 centímetro cúbico de agua líquida pesa 1 gramo; pero cuando se encuentra en estado sólido (hielo) su densidad es menor, por eso el hielo flota en el agua líquida. Este fenómeno se denomina dilatación anómala del agua.

La máxima densidad del agua pura se alcanza a los 3,98 °C y 1 atmósfera de presión, y corresponde a **1 g/cm³**.

Masa del agua: La masa del agua se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{Q \cdot v}{f} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde **M_w**: es la masa del agua, **Q**: caudal de agua y **f** Volumen específico a la temperatura del fluido

Calor específico: Es la cantidad de energía calórica que se necesita para elevar en **1°C** la temperatura de **1g** de agua. El calor específico del agua es **1 cal/g°C**.

Tensión superficial: Se define como la fuerza elástica que hay en la superficie de un líquido. Las moléculas que se encuentran bajo la superficie del agua son atraídas en todas las direcciones por fuerzas intermoleculares. En cambio, las que se encuentran en la superficie, solo son atraídas hacia abajo o hacia el lado por otras moléculas, provocando que la superficie se tense como una capa elástica. Punto de ebullición: Es la temperatura a la cual la presión del vapor de un líquido se iguala a la presión

atmosférica externa. Para el agua, el punto de ebullición es de 100°C. El punto de ebullición de un líquido depende de la presión externa. Por ejemplo, a nivel del mar, el agua hierve a 100°C; sin embargo, si se hace hervir agua en una montaña, la temperatura a la cuál hervirá será menor.

2.2.19 Características físicas del aire

Enciclopedia de Características (2017), señala que el aire es una masa más o menos homogénea de gases contenida en la atmósfera de la Tierra por el empuje de la fuerza de gravedad del planeta. El aire es una sustancia transparente (en la mayoría de los casos), de constitución variada y permeable, poco densa, que opone relativamente poca resistencia a los cuerpos que se desplazan a través de ella.

El aire es vital para la vida en el planeta tal y como la conocemos, pues contiene y traslada de un sitio a otro los gases necesarios para la respiración y la fotosíntesis, además de ser el canal para el traslado del vapor de agua, necesario en el cumplimiento del ciclo hidrológico vital.

Características del aire: El aire se conforma de diversas sustancias químicas en estado gaseoso y en proporciones ligeramente variables de acuerdo al lugar del planeta. A grandes rasgos las proporciones son:

78% de nitrógeno

21% de oxígeno

1% de otras sustancias

Esas “otras sustancias” suelen ser: ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y otros gases nobles como el neón, kriptón, xenón o argón. También contiene, en menor cantidad, gas metano, monóxido de carbono y Amoníaco, sustancias cuyo crecimiento en la atmósfera se ha vinculado con los márgenes de contaminación del aire producto de las actividades humanas.

Masa de aire: La masa del aire se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$Ma = \frac{Qa}{a} \quad (Ec. 27)$$

Donde ***Ma***: es la masa del aire, ***Qa***: caudal de aire y ***f*** Volumen específico a la temperatura del fluido.

Propiedades físicas: Las propiedades físicas del aire como conjunto son las típicas del estado gaseoso de la materia, a saber:

No tiene un volumen definido, sino que llena los espacios vacíos de manera uniforme. Es sensible a la temperatura: se expande y asciende en presencia de calor, o se contrae y cae al enfriarse. Esto se debe al ritmo de actividad que el calor impone a sus partículas. Tiene baja densidad, por lo que es penetrable con poca resistencia. Ejerce presión sobre los objetos. La presión sobre la superficie terrestre se denomina presión atmosférica.

Modifica sus propiedades en las alturas: a mayor altura menor temperatura, menor densidad, pero mayor presión atmosférica.

Los vientos: A grandes rasgos, los vientos se deben a los fenómenos de expansión y movimiento del aire de la atmósfera: una masa de aire se desplaza de manera horizontal desde un punto A a un punto B, compensando así las diferencias de presión que existan entre ambos.

Semejante variación es posible gracias al calentamiento de las masas de aire, producto de la radiación solar o de otros procesos, y que el aire caliente asciende y empuja hacia arriba, dejando que su lugar sea ocupado por una nueva masa equivalente de aire más frío, que se calentará a su vez y así sucesivamente.

Clima y sensación térmica: Los distintos fenómenos que dan origen a los diversos climas que existen, tienen lugar en la atmósfera y atañen directamente a la composición del aire: su tendencia al enfriamiento, su movilidad, su presión y los niveles de humedad en el aire.

De allí, por ejemplo, que exista discrepancia entre la temperatura registrada y la sensación térmica, ya que la cantidad de viento y la humedad atmosférica influyen directamente en la cantidad de temperatura percibida.

La atmósfera: La masa de aire que rodea a La Tierra, en sus distintos niveles o capas, se denomina atmósfera. En ella se mantienen unidos los distintos gases que componen el aire, pero en distinta proporción de acuerdo a la altura alcanzada, ya que el mayor volumen de gases se concentra, por acción gravitacional, en los 11km iniciales de la atmósfera, es decir, los que se encuentran más cercanos al suelo.

La capa de ozono: En los niveles exteriores de la atmósfera, el aire alcanza propiedades particulares y permite la existencia abundante de ozono, una variante del oxígeno (tres átomos de oxígeno juntos constituyen una molécula de ozono) que conserva su estabilidad sólo en condiciones especiales de presión y temperatura.

De esta manera, se constituye una capa de dicho gas que resulta sumamente benéfica para la vida en el planeta, y que se denomina la capa de ozono. Dicha capa tiene la propiedad de filtrar la radiación ultravioleta del sol y evitar que su impacto en la tierra resulte pernicioso.

Desastres naturales: Los huracanes y los tornados son algunos de los desastres naturales que pueden generarse a partir de condiciones específicas del aire en la atmósfera, y que contienen un alto potencial destructivo que se traduce, a menudo, en un costo elevado de vidas humanas. Cada uno tiene características y orígenes distintos.

Los huracanes tienen su origen en las masas de aire caliente del trópico y consisten en un circuito cerrado de flujo de aire húmedo en condensación, girando en torno a un núcleo cálido de baja presión. Esto origina lluvias intensas y vientos de mucha envergadura, y dependiendo de qué tanto lo sean puede clasificarse en depresión tropical, tormenta tropical, huracán, tifón o ciclón.

Los tornados suelen ser breves (pocos segundos o una hora) pero intensos, y consisten en una columna de aire que gira sobre su eje a altísimas velocidades, producto de confluencias de masas de aire de temperaturas opuestas.

Contaminación del aire: Tal y como el agua o cualquier medio ambiente, el aire sufre los efectos de la inserción de sustancias extrañas a su composición natural,

pudiendo perder muchas de sus cualidades intrínsecas o llegando a esparcir sustancias nocivas para la vida.

Dicha contaminación puede ser natural, al ser producto de accidentes geográficos o eventos impredecibles como la explosión de volcanes, el impacto de meteoritos o ciertos tipos de sustancia emitidos por animales o grandes extensiones vegetales.

En cambio, la contaminación artificial tiene que ver con las actividades del hombre, preferentemente las de tipo industrial que liberan sustancias tóxicas a la atmósfera, como monóxido de carbono, ozono, dióxido de azufre o partículas de plomo en suspensión. Muchos de estos compuestos ni siquiera existen en estado natural, y sus efectos pueden ser sumamente perniciosos para el ecosistema terrestre.

Gas ideal: Un gas ideal es un gas teórico compuesto de un conjunto de partículas puntuales con desplazamiento aleatorio que no interactúan entre sí. El concepto de gas ideal es útil porque el mismo se comporta según la ley de los gases ideales, una ecuación de estado simplificada, y que puede ser analizada mediante la mecánica estadística.

En condiciones normales tales como condiciones normales de presión y temperatura, la mayoría de los gases reales se comporta en forma cualitativa como un gas ideal. Muchos gases tales como el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, aire, gases nobles, y algunos gases pesados tales como el dióxido de carbono pueden ser tratados como gases ideales dentro de una tolerancia razonable.¹ Generalmente, el apartamiento de las condiciones de gas ideal tiende a ser menor a mayores temperaturas y a menor densidad (o sea a menor presión),¹ ya que el trabajo realizado por las fuerzas intermoleculares es menos importante comparado con energía cinética de las partículas, y el tamaño de las moléculas es menos importante comparado con el espacio vacío entre ellas.

Las propiedades termodinámicas de un gas ideal pueden ser descritas por dos ecuaciones:

La ecuación de estado de un gas ideal clásico que es la ley de los gases ideales y la energía interna a volumen constante de un gas ideal que queda determinada por la expresión:

$$P V = n R T \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde P: es la presión, V: es el volumen, n: es la cantidad de sustancia de un gas (en moles), R: es la constante de los gases (**8.314 J · K⁻¹ mol⁻¹**) y T: es la temperatura absoluta. Esta también se puede escribir de la siguiente manera:

$$P \bar{v} = R T \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde \bar{v} : es el volumen específico del fluido.

2.2.20 Disponibilidad en tuberías

Genez (2016), señala que la expresión de conservación de la energía en un ducto o tubería cuando no hay fuerzas disipativas es la ecuación 30:

$$\frac{P_1}{\rho} + g Z_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + g Z_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde P_1 : es la presión en el punto 1, ρ : es la densidad, g: es la gravedad, V_1 : es la velocidad en el punto 1 P_2 : es la presión en el punto 2 y V_2 : es la velocidad en el punto 2. Para el cálculo de disponibilidad de un punto específico de la tubería:

$$H_o = \frac{P_o}{\gamma} + Z_o + \frac{V_o^2}{2g} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde H_o disponibilidad en el punto 0. Para el cálculo del área de una tubería la fórmula es la siguiente:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde A: área de una tubería y D: diámetro de la tubería.

2.2.21 Regímenes en función del número de Reynolds

Y. Cengel (1995), señala que los regímenes en función del número de Reynolds se pueden comprender con una inspección cuidadosa del flujo en una tubería, ya que esto revela que el flujo de fluidos es de líneas de corriente aproximadamente paralelas a bajas velocidades, pero se vuelve caótico conforme la velocidad aumenta sobre un valor crítico (**Ver figura 19**). Se dice que el régimen de flujo en el primer caso es laminar, y se caracteriza por líneas de corriente suave y movimiento sumamente ordenado; mientras que en el segundo caso es turbulento, y se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; más bien, sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento.

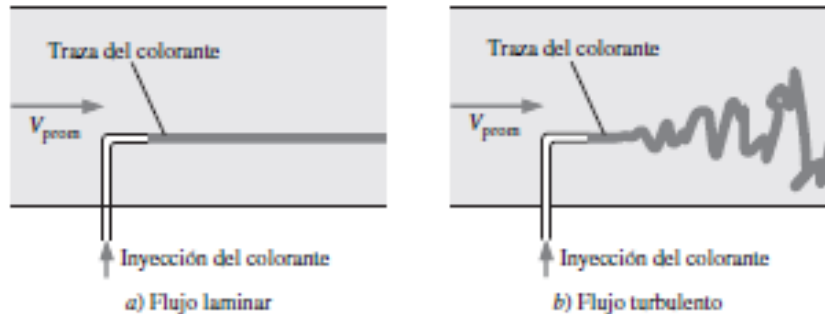


Figura 19. Ejemplo de aumento de velocidad en una tubería.

Fuente: Yunus Cengel de Mecánica de los fluidos (2017).

La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos. El flujo laminar se encuentra cuando los fluidos muy viscosos, como los aceites, fluyen en pequeñas tuberías o pasajes estrechos. Es posible verificar la existencia de dichos regímenes de flujo laminar, transicional y turbulento cuando se inyectan algunas líneas de colorante en el flujo en una tubería de vidrio, como hizo el ingeniero británico Osborne Reynolds (1842-1912) hace más de un siglo. Él observó que las líneas de

colorante formaban una línea recta y suave a bajas velocidades cuando el flujo era laminar (es posible verlas un poco borrosas debido a la difusión molecular), tenían estallidos de fluctuaciones en el régimen transicional y zigzagueaban rápida y aleatoriamente cuando el flujo se volvía totalmente turbulento. Dichos zigzagueos y la dispersión del colorante son indicadores de las fluctuaciones en el flujo principal y la rápida mezcla de las partículas de fluido de capas adyacentes.

La intensa mezcla del fluido en el flujo turbulento como resultado de las rápidas fluctuaciones mejora la transferencia de cantidad de movimiento entre las partículas del fluido, lo que aumenta la fuerza de fricción sobre la superficie y por tanto la potencia de bombeo necesaria. El factor de fricción alcanza un máximo cuando el flujo se vuelve totalmente turbulento.

2.2.22 Número de Reynolds

Y Cengel (1995), señala que la transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. Después de experimentos exhaustivos en los años de 1880, Osborne Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular.

$$\text{Re} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{\text{Prom}} D}{\nu} = \frac{\rho V_{\text{Prom}} D}{\mu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde V_{prom} , velocidad de flujo promedio ($\mathbf{m/s}$), D longitud característica de la geometría (diámetro en este caso, en m), y ν , m^2/s , viscosidad cinemática del fluido (\mathbf{m}^2/s). Note que el número de Reynolds es una cantidad adimensional. (Además, la viscosidad cinemática tiene las unidades de m^2/s y se puede ver como difusividad viscosa o difusividad de cantidad de movimiento. A números grandes de Reynolds, las fuerzas inerciales, que son proporcionales a la densidad del fluido y al cuadrado de la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y por lo tanto las

fuerzas viscosas no pueden evitar las aleatorias y rápidas fluctuaciones del fluido. Sin embargo, a números de Reynolds pequeños o moderados, las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para suprimir dichas fluctuaciones y mantener al fluido en línea. Por lo tanto, el flujo es turbulento en el primer caso y laminar en el segundo.

El número de Reynolds en donde el flujo se vuelve turbulento se llama número de Reynolds crítico, Re_{cr} . El valor del número de Reynolds crítico es diferente para geometrías y condiciones de flujo distintas. Para flujo interno en una tubería circular, el valor generalmente aceptado del número de Reynolds crítico es $Re_{cr} = 2.300$.

Para flujo a través de tuberías no-circulares, el número de Reynolds se basa en el diámetro hidráulico Dh , que se define como:

$$D = \frac{4 Ac}{P} \quad (Ec. 34)$$

Donde Ac es el área de sección transversal de la tubería y P es su perímetro húmedo. El diámetro hidráulico se define de modo que se reduce a diámetro común D para tuberías circulares:

$$D = \frac{4Ac}{Ph} = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D \quad (Ec. 34.1)$$

Es deseable tener valores precisos de números de Reynolds para flujos laminar, transicional y turbulento, pero éste no es el caso en la práctica. Es evidente que la transición de flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re < 2300$, turbulento para $Re > 4000$, y transicional entre ellos. Es decir

$Re < 2100$ Flujo laminar

$2100 < Re < 4000$ Zona inestable

$4000 < Re < 10000$ Flujo turbulento

Re > 10000 Regimen completamente turbulento.

2.2.23 Caída de presión y pérdida de carga

Y Cengel (1995), señala que un interés considerable en el análisis de flujo de tubería es el que causa la caída de presión P , porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que el ventilador o bomba mantengan el flujo. Note que $dp/dx = \text{constante}$ y cuando se integra de $x=x_1$, donde la presión es P_1 , hasta $x=x_1+L$, donde la presión es P_2 , produce:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (\text{Ec. 35})$$

También se puede expresar como:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu LV_{prom}}{R^2} = \frac{32\mu LV_{prom}}{D^2} \quad (\text{Ec. 36})$$

El símbolo Δ se utiliza comúnmente para indicar la diferencia entre los valores final e inicial, como $\Delta y = y_2 - y_1$. Pero en flujo de fluidos, ΔP se usa para designar caída de presión, y por lo tanto es $P_1 - P_2$. Una caída de presión ocasionada por efectos viscosos representa una pérdida de presión irreversible llamada pérdida de presión ΔP_L para destacar que es una pérdida (tal como la pérdida de carga h_f , que es proporcional a ella).

G. Caraballo (2014), señala que a medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción que hay entre el líquido y la pared de la tubería; tales energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. La pérdida de carga h_f representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. Varias fórmulas pueden estimar la pérdida de carga entre ellas:

$$h_f = K Q^n \quad (\text{Ec. 37})$$

Dónde: h_f : Pérdida de disponibilidad.

K: Constante que depende de las características de las tuberías (longitud, diámetro y rugosidad) y el fluido (viscosidad), Q: Caudal que circula por la tubería, n: Constante que depende del régimen de flujo, $n=1$ para flujo laminar y $n=2$ para flujo completamente turbulento. Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (\text{Ec. 38})$$

Dónde: f : factor de fricción, L: longitud del tramo de tubería (m), D: diámetro interno de la tubería (m), V: velocidad promedio del fluido (m/s) y Q: caudal (m³/s). El factor de fricción (f) se obtiene mediante el diagrama de Moody (Ver figura 20), entrando en el mismo en el eje vertical izquierdo ubicando el Reynolds y con el eje horizontal $\frac{L}{D}$ que se estima con el diámetro D y el material de la tubería.

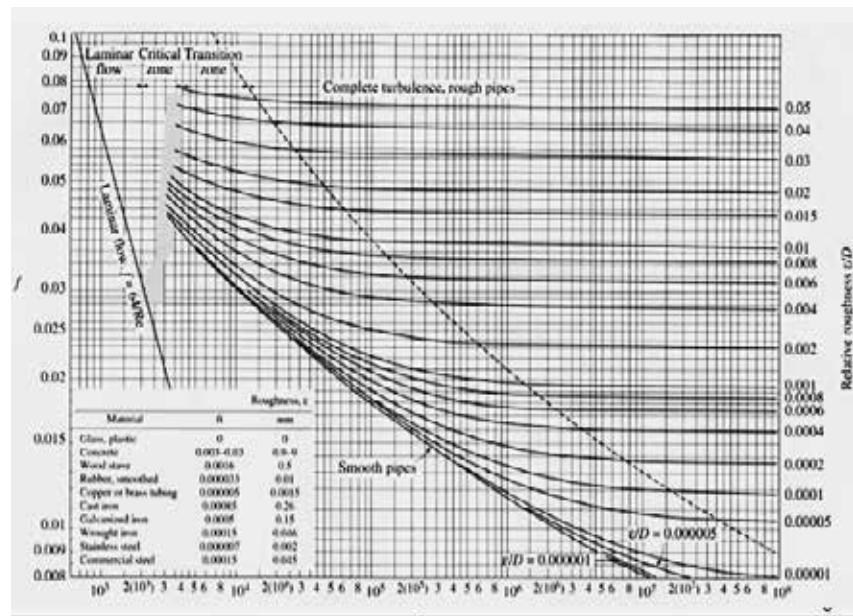


Figura 20. Diagrama de Moody.

Fuente: Laminas de Mecánica de los fluidos, Gruber Caraballo (2017).

Ecuación de Manning (únicamente empleada para agua):

$$H_f = 10,3L \left(\frac{Q^2}{D^{5,333}} \right) n^2 \quad (Ec. 39)$$

COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING EN MATERIALES			
Material	n	Material	n
Plástico (PE, PVC)	0,006-0,010	Fundición	0,012-0,015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,009	Hormigón	0,012-0,017
Acero	0,010-0,011	Hormigón revestido con gunita	0,016-0,022
Hierro galvanizado	0,015-0,017	Revestimiento bituminoso	0,013-0,016

Figura 21. Coeficiente de rugosidad.

Fuente: Laminas de Mecánica de los fluidos, Gruber Caraballo (2017).

Además de las pérdidas por fricción en toda tubería a menos que se trate de un solo tramo de la misma existen pérdidas menores o pérdidas por instrumentos y son aquellas que ocurren localmente debido a cualquier disturbio del flujo provocado por curvaturas o cambios en la sección. Especialmente se ha demostrado que la magnitud de las pérdidas es aproximadamente proporcional al cuadrado de la velocidad. Es común expresar las pérdidas menores como función de la cabeza de la velocidad en el tubo $V^2/2g$:

$$H = K \frac{V^2}{2g} \quad (Ec. 40)$$

Las pérdidas totales por tramo de tubería:

$$l = f + m \quad (Ec. 41)$$

Donde **hl**: las pérdidas totales de la tubería por el tramo, hf: las pérdidas por fricción en un tramo de tuberías y hm: las pérdidas por accesorios, con las pérdidas calculadas se puede calcular la altura de succión de la bomba con la siguiente ecuación:

$$H_{suc} = H_1 \quad L \text{ de succion} \quad (Ec. 42)$$

Donde H_{suc} : altura de succión, H_1 : disponibilidad de la tubería en el tramo de succión y h_l : las pérdidas totales de la tubería por el tramo de succión, a su vez se puede calcular la altura de descarga de la bomba con la siguiente ecuación:

$$H_d = H_2 + L \text{ de descarga} \quad (Ec. 43)$$

Donde H_d : altura de descarga de la bomba, H_2 : disponibilidad en el tramo de descarga de la bomba y h_l : las pérdidas totales de la tubería por el tramo de descarga. La altura desarrollada por una bomba (H_b) se determina midiendo la presión en la aspiración y en la descarga de la bomba, calculando las velocidades mediante la división de caudal entre las áreas de entrada y salida, y conociendo las alturas de aspiración y descarga. La ecuación que describe este planteamiento es la siguiente:

$$H_b = H_d - H_{suc} \quad (Ec. 44)$$

2.2.24 Bomba centrífuga

F. White (2015), señala que las características bombas centrífugas, están constituidas por un rotor dentro de una carcasa (**Ver figura 22**). El fluido entra axialmente a través del ojo, en el eje de la carcasa, los álabes del rotor la fuerzan a tomar un movimiento tangencial y radial hacia el exterior del rotor, donde es recogido por una carcasa que hace de difusor. El fluido aumenta su velocidad y presión cuando pasa a través del rotor. La parte de la carcasa, de forma toroidal, o voluta, decelera el flujo y aumenta más la presión.

Normalmente, los álabes están curvados hacia atrás, pero existen también diseños de álabes radiales y curvados hacia delante, con los cuales se cambia ligeramente la presión a la salida de la bomba. Los álabes pueden ser abiertos (separados de la parte frontal de la carcasa sólo por una pequeña holgura) o cerrados (protegidos de la carcasa por un disco a cada lado). El difusor puede no tener álabes, o estar equipado con álabes fijos para ayudar al guiado del fluido hacia la salida.

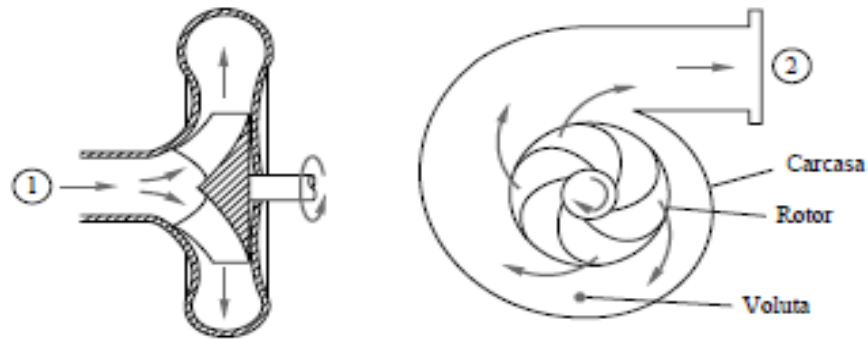


Figura 22. Esquema de una bomba centrífuga típica.

Fuente: Mecánica de fluidos Frank White (2017)

2.2.25 Cálculos básicos

F. White (2015), señala que la potencia dada al fluido es igual al producto del peso específico por el caudal y por la altura manométrica:

$$P_w = \rho g Q H \quad (\text{Ec. 45})$$

Tradicionalmente a esta potencia se le ha llamado potencia útil. La potencia necesaria para mover la bomba es la potencia al freno:

$$P_f = \omega T \quad (\text{Ec. 46})$$

Donde ω es la velocidad angular del eje y T el par en el eje. Si no hubiese pérdidas, P_w y la potencia al freno serían iguales, pero P_w es siempre menor, definiéndose el

$$W = \frac{P_w}{P_f} = \frac{\rho g Q H}{\omega T} \quad (\text{Ec. 47})$$

es el más grande posible, en el margen más grande de valores del caudal Q . El rendimiento es el resultado, básicamente, de tres factores: volumétrico, hidráulico y mecánico. El rendimiento volumétrico es:

$$v = \frac{Q}{Q + Q_l} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde Q_l es el caudal perdido debido a las fugas por las holguras entre la carcasa y el rotor.

2.2.26 Curvas características de bombas

F. White (2015), señala que los principios generales y la presentación de los datos son exactamente los mismos para bombas helicocentrífugas y axiales y para compresores. Las curvas características (**Ver figura 23**), se trazan casi siempre para velocidad de giro del eje n (normalmente en rpm) constante. El caudal Q se toma como variable independiente básica. Como variables dependientes, o «de salida», se consideran la altura manométrica H (incremento de presión Δp para gases), la potencia al freno P_f y el rendimiento η .

La altura manométrica es aproximadamente constante a caudales bajos y después decrece hasta cero para $Q = Q_{m\acute{a}x}$. A la velocidad de giro y tamaño del rotor considerados, la bomba no puede suministrar más caudal que $Q_{m\acute{a}x}$. La parte de pendiente positiva de la curva correspondiente a la altura manométrica se muestra a trazos; esta región, como se ha mencionado antes, puede ser inestable y originar oscilaciones de bombeo.

El rendimiento η siempre es nulo cuando no hay flujo y cuando $Q = Q_{m\acute{a}x}$, alcanzando su máximo, entre el 80 y el 90 por 100, para caudales alrededor de $0,6Q_{m\acute{a}x}$. Éste es el caudal de diseño Q^* o punto de máximo

a en el PMR se denominarán H^* y P^* (o P_f^*), respectivamente. Es deseable que la curva de rendimiento sea plana en las de forma que se disponga de un rango de operación lo más amplio posible, aunque no todos los diseños consiguen curvas de eficiencia planas. en función de

estos datos a partir de la Ecuación (47), $\eta = \rho g Q H / p_f$.

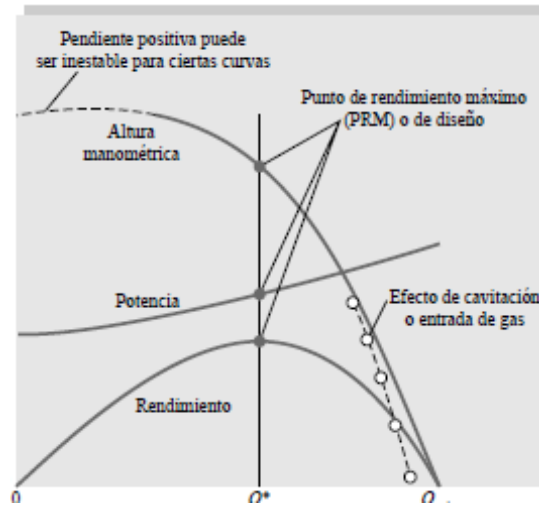


Figura 23. Curvas características de una bomba centrífuga.

Fuente: Mecánica de fluidos Frank White (2017).

2.2.27 Reglas de semejanza

G. Caraballo (2014), señala que correlacionar los datos de bombas nos lleva a reglas simples para comparar las características de bombas (Ver figura 24). Si las bombas 1 y 2 son de la misma familia geométrica y están operando en puntos homólogos (la misma posición en un gráfico adimensional como el de la figura 24), las reglas o relaciones son las siguientes:

Primera regla: la relación entre los caudales es directamente proporcionales a la relación entre los números de revoluciones multiplicadas por la relación de los diámetros a la tercera potencia. (Manteniendo constante el número de Reynolds)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (Ec. 49)$$

Segunda regla: la relación entre las alturas útiles es directamente proporcionales al cuadrado de la relación entre los números de revoluciones multiplicadas por la relación de los diámetros a la segunda potencia. (Manteniendo constante el número de Reynolds).

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (Ec. 50)$$

Tercera regla: la relación entre las potencias es directamente proporcionales al cubo de la relación entre los números de revoluciones multiplicadas por la relación de los diámetros a la quinta potencia:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \quad (Ec 51)$$

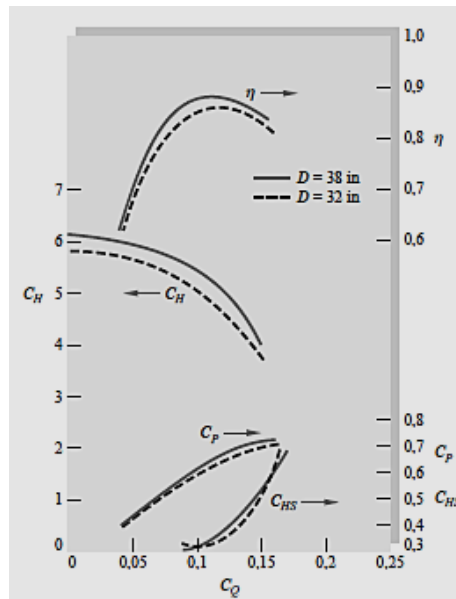


Figura 24. Curvas características adimensionales de una bomba.

Fuente: Mecánica de fluidos Frank White (2017).

Las aplicaciones de las reglas de la semejanza en las máquinas hidráulicas nos permitirán obtener los parámetros de funcionamiento de una turbomáquina a partir de otra, con sólo imponer una serie de condiciones geométricas y de funcionamiento a ambas máquinas:

Determinar las curvas de respuesta de una bomba cuando cambia su velocidad de rotación: Por ejemplo, para aplicar una bomba a un motor diferente, si queremos controlar la bomba mediante un variador de frecuencia (variación del régimen de giro).

Obtener las características de una maquina semejante a otra, pero de diferente tamaño: Por ejemplo, obtener las curvas de funcionamiento de una bomba cuando se

cambia el tamaño del rodete, o hacer un ensayo con un modelo a escala de la máquina a utilizar. Para calcular el % de reducción del rodete normalmente se usa la fórmula:

$$\%deRecorte = \left(\frac{D_2 - D_1}{D_2} \right) 100\% \quad (Ec. 52)$$

Para matizar el comportamiento de las máquinas ensayadas a través de ábacos adimensionales y diagramas universales: Se trata de obtener características funcionales en función de distintos parámetros con el objetivo de poseer datos para futuros prototipos o caracterizar familias de bombas.

Se suele tomar como variables independientes: N: velocidad de rotación, D: Longitud Característica y como variables dependientes: Q, H, P.

Todos los puntos (QH) de funcionamiento homólogos a uno dado de referencia (Q1, H1) estarán sobre la misma curva parabólica que pasará por el origen de coordenadas (Q=0, H=0) (**Ver figura 25**). Hay que recordar que todos estos puntos tienen el mismo rendimiento, por ello la ecuación:

$$H_2 = K_{hq} Q_2^2 \quad \text{y} \quad K_{hq} = \frac{H_1}{Q_1^2} \quad (Ec. 53)$$

Esta se denomina parábola de isoeficiencia o isorendimiento.

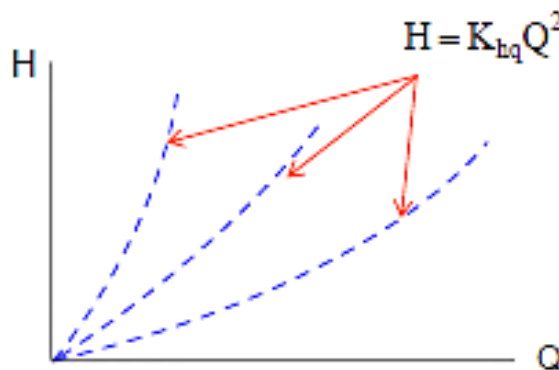


Figura 25. Parábola de isoeficiencia.

Fuente: Laminas de Turbomaquinas, Gruber Caraballo (2017)

A su vez existe una cuarta regla de semejanza donde se relaciona el NSPH o La carga neta positiva de succión disponible que se escribe como qué tan elevada debe ser la presión del flujo en la succión de la máquina para evitar problemas de cavitación y la fórmula es la siguiente:

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (Ec. 54)$$

2.2.28 Transferencia de calor

C. Romero (2005), señala que las leyes de la Termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero solo se refieren a sistemas que están en equilibrio. Por ello, permiten determinar la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez con que puedan producirse estos cambios. La transferencia de calor complementa la primera y la segunda ley, proporcionando los métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir esta velocidad de transmisión.

Sin embargo, con el objeto de conseguir las velocidades de flujo y los coeficientes de transmisión globales más convenientes, estudiando las torres de enfriamiento como intercambiadores de calor entre dos fluidos, existe una ecuación que puede permitir calcular el calor a partir de las temperaturas terminales de las dos corrientes del fluido si:

Coeficiente de transmisión global U_m es válido para todo el cambiador.

El régimen de funcionamiento es estacionario.

Los calores específicos medios son prácticamente constantes para cada una de las corrientes fluidas.

Las pérdidas de calor son despreciables

A todos los elementos de las dos corrientes fluidas les corresponde la misma historia térmica.

Por su parte N. Febles (2005), señala que para cualquiera que sea el tipo de aparato utilizado, si sólo se tiene en consideración las condiciones de entrada y de salida de los dos fluidos, se puede establecer el balance térmico global del aparato escribiendo que la cantidad de calor Q perdida por el fluido caliente es igual a la que toma el fluido frío, si se desprecian las pérdidas térmicas se obtiene la ecuación 55:

$$Q = m_1(h_{e1} - h_{s1}) = m_2(h_{s2} - h_{e2}) \quad (Ec. 55)$$

Donde m_1 : caudal másicos del fluido caliente, h_{e1} : entalpía de entrada del fluido caliente, h_{s1} : entalpía de salida del fluido caliente, m_2 : caudal másicos del fluido frío, h_{e2} : entalpía de entrada del fluido frío y h_{s2} : entalpía de salida del fluido frío también puede escribirse en función de las capacidades caloríficas como muestra la ecuación 56:

$$Q = m_1 C_{p1}(T_{e1} - T_{s1}) = m_2 C_{p2}(T_{s2} - T_{e2}) \quad (Ec. 56)$$

Donde C_{p1} : capacidad calorífica del fluido caliente, C_{p2} : capacidad calorífica del fluido frío, T_{s1} : temperatura de salida del fluido caliente, T_{e1} : Temperatura de entrada del fluido caliente T_{s2} : temperatura de salida del fluido frío y T_{e2} : Temperatura de entrada del fluido frío. A su vez se puede calcular el número de Lewis (Le) es un número adimensional definido como el cociente entre la difusividad térmica y la difusividad másica. Se usa para caracterizar flujos en donde hay procesos simultáneos de transferencia de calor y masa por convección como en las torres de enfriamiento. y se define como.

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (Ec. 57)$$

En donde α : es la difusividad térmica, D : es la difusividad másica y Le : El número de Lewis puede expresarse también en términos de número de Schmidt y número de Prandtl.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (Ec. 58)$$

El Número de Prandtl (Pr) es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica se llama así en honor a Ludwig Prandtl. se define como:

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{\text{velocidad de difusion de momento}}{\text{velocidad de difusion de calor}} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (\text{Ec. 59})$$

En donde: γ : es la viscosidad cinemática, α : es la difusividad térmica, C_p : es la capacidad calorífica a presión constante, μ : es la viscosidad y k : es la conductividad térmica. Y El Número de Schmidt (S_c) es un número adimensional definido como el cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, y se utiliza para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa se llama así en honor a Ernst Schmidt. El número de Schmidt relaciona los grosores de las capas límite de cantidad de movimiento y de masa Se define como:

$$S_c = \frac{\gamma}{D} \quad (\text{Ec. 60})$$

En donde: γ es la viscosidad cinemática y D : es la difusividad másica.

2.2.29 Eficiencia de una Torre de enfriamiento

L. Obregón, J. Pertuz & R. Domínguez (2016) señalan que la eficiencia de la torre de enfriamiento, ver ecuación 60, es la relación entre el rango de operación y rango ideal, el cual sería la diferencia entre la temperatura del agua de entrada y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente:

$$(\%) = \frac{\text{Rango}}{\text{Rango} + \text{Aproximacion}} \cdot 100 = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{bh}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 61})$$

Donde $(\%)$: es la eficiencia de la torre de enfriamiento, T_i : Temperatura de entrada del agua, T_o : Temperatura de salida del agua y T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo.

2.2.30 Problemas Comunes Presentes en los Sistemas de Enfriamiento de Agua

J. Orellana (2005), señala que gracias a la facilidad de contaminación del agua muchas torres de enfriamiento al disponer de la misma, pueden ser objeto de contaminantes y una serie de problemas no solo para el agua como tal si no que pueden presentar problemas para la operación de la torre de enfriamiento.

2.2.31 Características del agua que deben tomarse en consideración

J. Orellana (2005), señala que las características del agua que deben tomarse en consideración son:

Conductividad: Los programas de tratamiento del agua de enfriamiento funcionarán dentro de rangos específicos de conductividad; el rango dependerá del diseño del agua de enfriamiento particular, de las características y del tipo del programa químico.

pH: El control de pH es crítico para la mayoría de los programas de tratamiento de agua de enfriamiento. En general, cuando el pH está debajo de los rangos recomendados la probabilidad de corrosión se incrementa y cuando el pH está por encima de los rangos recomendados, la probabilidad de formación de incrustaciones se incrementa.

La efectividad de muchos biocidas también depende del pH; en consecuencia, pHs altos o bajos pueden permitir el crecimiento y desarrollo de problemas microbiológicos.

Alcalinidad: La alcalinidad y el pH están relacionados, ya que un incremento en el pH indica un incremento de la alcalinidad y viceversa. Así como el pH, alcalinidad debajo del rango recomendado incrementa la probabilidad de corrosión; rangos por encima de lo recomendado incrementa la probabilidad de formación de incrustaciones. Cuando existen problemas de corrosión e incrustaciones, el ensuciamiento también será un problema.

Dureza: Los niveles de dureza están usualmente asociados con la tendencia del agua de enfriamiento a formar o no incrustaciones. Los programas químicos para prevenir incrustaciones pueden funcionar solamente cuando los niveles de dureza están

dentro del rango especificado. Algunos programas de control de corrosión requieren de un cierto nivel de dureza para funcionar correctamente como inhibidor de corrosión, por lo cual es importante asegurar que el nivel de dureza no esté debajo en aquellos programas.

2.2.32 Problemas frecuentes en los diferentes sistemas

J. Orellana (2005), señala que los problemas frecuentes en los diferentes sistemas son:

Sistemas de un sólo paso: El agua de enfriamiento pasa a través de un equipo de intercambio de calor solamente una vez. Debido a los grandes volúmenes de agua de enfriamiento que son usados, la temperatura del agua se incrementa sólo ligeramente. El contenido mineral del agua de enfriamiento permanece prácticamente sin cambio al pasar a través del sistema.

Se usan cuando existe disponibilidad de gran cantidad de agua y el tratamiento puede ser mínimo y generalmente no se usa tratamiento.

Sistemas de recirculación abiertos: Se denominan también sistemas evaporativos y son los más ampliamente usados en el diseño de enfriamiento industrial; usan tratamiento químico.

Este sistema consiste de bombas, intercambiadores de calor y torres de enfriamiento. Las bombas mantienen el agua circulando a través de los intercambiadores de calor, donde retiran calor, y de la torre de enfriamiento donde el calor es liberado del agua a través de la evaporación. Debido a la evaporación (disminución del volumen inicial de agua), el agua en los sistemas de agua de enfriamiento abiertos, sufre un incremento en su contenido químico.

Sistemas de recirculación cerrados: Usa la misma agua de enfriamiento repetidamente en un ciclo continuo. Primero, el agua absorbe calor del fluido del proceso y luego lo libera en otro intercambiador de calor. En estos sistemas no se incluye una torre de enfriamiento evaporativo, pero si usan un tratamiento químico. Un caso específico es el sistema de enfriamiento de agua de los vehículos automotores

Si no se tratan los sistemas de agua de enfriamiento, proporcionan un ambiente donde existirán los problemas principales del agua de enfriamiento, tales como:

Corrosión: El agua tiende a convertir los metales (tales como el acero dulce) a su estado oxidado.

Incrustación: Las impurezas del agua, tales como dureza de calcio y magnesio pueden precipitar y depositarse, dependiendo de sus concentraciones y de la temperatura del agua, pH, alcalinidad y otras características del agua.

Contaminación Microbiológica: Los sistemas de agua de enfriamiento ofrecen un ambiente favorable para el crecimiento de microorganismos, los cuales causan problemas.

Ensuciamiento: Los sólidos suspendidos, tanto de las fuentes externas como internas, pueden causar depósitos.

Problemas en los sistemas de agua de enfriamiento

Efectos de los problemas en los sistemas de agua de enfriamiento

Si no se controlan estos problemas en el agua de enfriamiento, juntos o por separado, pueden causar:

Incremento de los costos de mantenimiento.

Reducción de la eficiencia de transferencia de calor y grandes pérdidas de energía

Posible producción de paradas de planta.

2.2.33 Fallas comunes en torres de enfriamiento

En ciertos equipos las fallas de operación suelen ser las mismas ya que están operando bajo el mismo régimen o muy parecido con los mismos materiales casi bajo los mismos periodos de trabajo y para el mismo fin, en el caso de las torres de enfriamiento su operación y su funcionalidad no cambia mucho con respecto una de la

otra(como si pasa por ejemplo con dos carros de la misma marca) lo que puede cambiar considerablemente es si se trata de una torre muy grande como para enfriar agua para toda una planta a una torre pequeña para uso doméstico o didáctico y sin embargo muchas de las cosas que se le hacen son las mismas, por ello si hablamos de torres de la misma marca se pueden obtener una guía de fallas comunes y sus soluciones validas para varias torres. A continuación, Tabla 1. Guía de fallas comunes en torres de enfriamiento:

Tabla 1. Guía de fallas en torres de enfriamiento

FALLAS CORRECTIVAS	POSIBLES CAUSAS	MEDIDAS
Motor no arranca	No hay suministro de Energía eléctrica.	Chequear las conexiones al centro de motores, y de este al motor.
	Suministro de voltaje bajo.	Chequear suministro de voltaje, el cual puede diferir en 10% sobre el nominal.
	Conexiones Incorrectas	Comparar las conexiones con el diagrama que es mostrado en la placa del motor.
Alto nivel de ruido	Desbalanceamiento.	Chequear el balanceo correcto del ventilador.
	Rodamientos defectuosos.	Chequear lubricación Reemplazar el rodamiento si el ruido es excesivo y continuo.
	Materiales extraños entre el ventilador del motor y la carcasa.	Desarmar y limpiar.
Incremento excesivo de temperatura en los rodamientos.	Exceso de grasa	Remover el tapón de purga y poner en funcionamiento el motor hasta expulsar exceso.
	Falta de grasa	Añadir grasa según las especificaciones NOTA: Téngase sin embargo en cuenta que si se relubrica, se produce a menudo una elevación totalmente normal de la temperatura que puede perdurar 1-2 días.
	Rodamientos defectuosos.	Reemplazar rodamientos.

Continuación Tabla 1. Guía de fallas en torres de enfriamiento

FALLAS CORRECTIVAS	POSIBLES CAUSAS	MEDIDAS
Incremento excesivo de temperatura.	Obstrucción en el sistema de enfriamiento	Limpiar e inspeccionar periódicamente el sistema de ventilación.
	Voltaje y/o frecuencia incorrecta	Compara los valores con los de la placa. Chequear voltaje en los terminales del motor a plena carga.
	Sobrecarga.	Chequear voltaje y amperaje bajo condiciones normales de funcionamiento.
	Rozamiento entre el rotor y el estator.	Chequear voltaje y amperaje bajo condiciones normales de funcionamiento
Vibraciones intensas en los rodamientos	Partículas extrañas en los rodamientos.	Limpiar los rodamientos está en buenas condiciones relubricar, caso contrario reemplazar

Datos obtenidos de Goodyear de Venezuela (2001).

2.2.34 Mantenimiento de componentes

. Baltimore Aircoil (2004) señala que para las puestas en marcha de una torre de enfriamiento deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

Efectuar una inspección visual sobre ventiladores, motores y reductores de velocidad, debe hacer correcta lubricación y la correa del ventilador debe estar tensada.

Debe controlarse el sentido de giro y las vibraciones del ventilador, ajustar el ángulo de los álabes si es necesario.

Inspeccionar los rellenos, comprobar el buen estado, la correcta colocación y la posible formación de algas que obstruya el paso del aire.

La válvula que controla la reposición debe estar en buen estado y en la medida de lo posible sin corrosión que impida su funcionamiento.

Durante la operación pueden aparecer algunos problemas comunes que se describen a continuación:

Una distribución irregular del agua.

Puede deberse a obstrucciones en los pulverizadores, rellenos deteriorados o caudal de agua excesivo.

Temperatura elevada a la salida de la torre.

Puede deberse a un excesivo flujo de agua, rellenos mal colocados o en mal estado o aire insuficiente. Se recomienda comparar las condiciones de operación con las condiciones de diseño y comprobar el estado de los rellenos.

Agua de reposición excesiva.

Puede deberse eliminadores de gotas más ubicados o rotos, excesivo flujo de agua o demasiada inclinación de las palas del ventilador.

En cuanto al mantenimiento periódico que debe efectuarse sobre una torre cabe anotar lo siguiente:

Cada 6 meses se recomienda una inspección de los rellenos, evaluar su posición y realizar limpieza manual para retirar algas, hongos y demás incrustaciones.

Puede realizarse una limpieza anual de las balsas.

Evaluar el rendimiento de las bombas y de los ventiladores periódicamente, se recomienda contar con las curvas características de dichos elementos y realizar mediciones eléctricas que permitan conocer la eficiencia de la operación.

Deben realizarse evaluaciones de la calidad del agua de recirculación para evitar niveles de acidez y alcalinidad inadecuados que generen problemas de incrustaciones en los rellenos, corrosión en las tuberías y erosión sobre los materiales. En la figura a se presenta una tabla con los niveles de sólidos recomendados en el agua de recirculación.

2.2.35 Tanque de agua

Maicky (2009), señala que se puede definir la presión en un tanque con la siguiente expresión:

$$P_{Tanque} = P_0 + (\rho \cdot g \cdot h) \quad (Ec. 61)$$

Donde P_{Tanque} : es la presión ejercida en un tanque, P_0 : Presión atmosférica si este tanque está abierto a la atmosfera es 0, ρ : densidad el fluido en el tanque, g : gravedad y h : altura del punto.

2.3 Definición de conceptos básicos

A continuación, se definen algunos términos usados en el trabajo de investigación y se define un resumen de términos usados en los cálculos (Ver tabla 2):

Alcalinidad: En el agua de enfriamiento dos formas de alcalinidad juegan un rol clave, ellas son la alcalinidad de carbonatos ($CO_3^{=}$) y la alcalinidad de bicarbonatos (HCO_3^{-}).

Calor: El calor no es una nueva forma de energía, es el nombre dado a una transferencia de energía de tipo especial en el que intervienen gran número de partículas. Se denomina calor a la energía intercambiada entre un sistema y el medio que le rodea debido a los choques entre las moléculas del sistema y el exterior al mismo y siempre que no pueda expresarse macroscópicamente como producto de fuerza por desplazamiento.

Conductividad: Es una medida de la facultad (habilidad) para conducir la electricidad. En agua de enfriamiento, la conductividad indica la cantidad de minerales y gases disueltos en el agua.

cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

Dureza: Se refiere a la cantidad de minerales de calcio y magnesio presentes en el agua. La dureza en agua natural puede variar de unas pocas partes por millón (ppm) a por encima de 800 ppm.

Energía: Se define como la capacidad para realizar un trabajo. Se denomina energía interna del sistema a la suma de las energías de todas sus partículas. En un gas ideal las moléculas solamente tienen energía cinética, los choques entre las

moléculas se suponen perfectamente elásticos, la energía interna solamente depende de la temperatura.

Equilibrio: Denominamos estado de equilibrio de un sistema cuando las variables macroscópicas presión, volumen, y temperatura, no cambian. El estado de equilibrio es dinámico en el sentido de que los constituyentes del sistema se mueven continuamente.

Humedad Absoluto: Es la cantidad de vapor de agua que contiene un estado de aire húmedo referido a 1Kg. De aire seco.

Humedad Relativa: es la cantidad de agua en forma de vapor que contiene un determinado estado de aire húmedo. Tiene un valor comprendido entre 0-100% y nos indica el grado de saturación. Cuando la humedad supera el 100% aparece el fenómeno de niebla.

Mantenimiento: Se puede considerar claramente que el mantenimiento nació con el desarrollo industrial, y en un principio consistía exclusivamente en reparaciones, las cuales fueron hasta 1914 ejecutadas por el mismo grupo de operación.

Tipos de Mantenimiento

El Mantenimiento Correctivo: es aquel en que solo se interviene en el equipo después de su fallo. Este tipo de mantenimiento, aplicado en muchas situaciones, tiene como principal ventaja la reducción de costes de inspecciones y reparaciones.

Mantenimiento preventivo: es un conjunto de técnicas que tiene como finalidad disminuir y/o evitar las reparaciones de los ítems con tal de asegurar su total disponibilidad y rendimiento al menor coste posible. Para llevar a cabo esta práctica se requiere rutinas de inspección y renovación de los elementos malogrados y deteriorados.

Mantenimiento predictivo: Es el conjunto de técnicas que permiten; reduciendo los costes del programa de mantenimiento tradicional, preventivo y correctivo, asegurar la disponibilidad y rendimiento de los elementos que componen la

planta. Este tipo de mantenimiento se basa en la realización de un seguimiento del estado del equipo mediante monitorizaciones que permiten realizar sustituciones y reparaciones cuando estos no se encuentren en buen estado, sin necesidad de realizar ciertas inspecciones, y reducir los fallos imprevistos por medio de un programa de detección de anomalías.

Masa: La masa, es una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo. Es una propiedad intrínseca de los cuerpos que determina la medida de la masa inercial y de la masa gravitacional.

La unidad utilizada para medir la masa en el Sistema Internacional de Unidades es el kilogramo (kg). Es una magnitud escalar.

Prácticas de laboratorio: El trabajo de laboratorio en investigación científica, es una recopilación de datos primarios (encuestas y observaciones) y secundarios (estadísticas) en un gabinete o laboratorio y no en el terreno de los hechos.

Peso: El peso es una medida de la fuerza gravitatoria que actúa sobre un objeto. El peso equivale a la fuerza que ejerce un cuerpo sobre un punto de apoyo, originada por la acción del campo gravitatorio local sobre la masa del cuerpo.

Peso específico: Se le llama Peso específico a la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

PH: Da una indicación de acidez o basicidad del agua. La escala del pH va del 0 al 14, donde el cero representa la máxima acidez y el 14 la máxima basicidad.

Presión: La presión es la magnitud escalar que relaciona la fuerza con la superficie sobre la cual actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la superficie

Temperatura: La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

Temperatura de bulbo húmedo: El termómetro de bulbo húmedo es un termómetro de mercurio que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado

de agua, que se emplea para medir la temperatura húmeda del aire. Al proporcionarle una corriente de aire, el agua se evapora más o menos rápidamente dependiendo de la humedad relativa del ambiente, enfriándose más cuanto menor sea ésta, debido al calor latente de evaporación del agua. La corriente de aire puede darse mediante un pequeño ventilador o poniendo el termómetro en una especie de carraca para darle vueltas.

Temperatura de bulbo seco: Temperatura de bulbo seco o temperatura seca es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.

Esta temperatura junto a la temperatura de bulbo húmedo es utilizada en la valoración del bienestar térmico, en la determinación de la humedad del aire y en psicrometría para el cálculo y estudio de las transformaciones del aire húmedo.

Mediante el diagrama psicrométrico o carta psicrométrica es posible a partir de dos valores de entrada, uno de los cuales suele ser la temperatura seca por su fácil determinación, conocer el resto de las propiedades de las mezclas de aire seco y vapor de agua.

Trabajo mecánico hecho por o sobre el sistema: Consideremos, por ejemplo, un gas dentro de un cilindro. Las moléculas del gas chocan contra las paredes cambiando la dirección de su velocidad, o de su momento lineal. El efecto del gran número de colisiones que tienen lugar en la unidad de tiempo, se puede representar por una fuerza que actúa sobre toda la superficie de la pared.

Viscosidad: La viscosidad es una característica de los fluidos en movimiento, que muestra una tendencia de oposición hacia su flujo ante la aplicación de una fuerza. Cuanta más resistencia oponen los líquidos a fluir, más viscosidad poseen. Los líquidos, a diferencia de los sólidos, se caracterizan por fluir, lo que significa que, al ser sometidos a una fuerza, sus moléculas se desplazan, tanto más rápidamente como sea el tamaño de sus moléculas. Si son más grandes, lo harán más lentamente.

Volumen específico: El volumen específico, es el volumen ocupado por unidad de masa de un material. Es la inversa de la densidad, por lo cual no dependen de la cantidad de materia.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología es una teoría de la investigación científica. Según Pardina (1982) “es el estudio crítico del método”. Desde el punto de vista semántico, el término significa tratado del método. Como tal se entiende como una guía procedimental, que se obtuvo producto de una reflexión, que provee pautas lógicas generales pertinentes para desarrollar y coordinar operaciones destinadas a la consecución de objetivos intelectuales o materiales del modo más eficaz posible. En este capítulo se expondrá la metodología que se usó para la realización de este trabajo de investigación.

3.1 Enfoque de la investigación

En el libro de metodología de la investigación de Hernández S. (2016), se describen los dos tipos de enfoques que se le pueden dar a la investigación en el caso de la investigación de tipo cuantitativa, se enumeran una serie de características y Hernández dice lo siguiente: “el investigador o investigadora considera lo que se ha investigado anteriormente (la revisión de la literatura) y construye un marco teórico (la teoría que habrá de guiar su estudio), del cual deriva una o varias hipótesis (cuestiones que va a examinar si son ciertas o no) y las somete a prueba mediante el empleo de los diseños de investigación apropiados. Si los resultados corroboran las hipótesis o son congruentes con éstas, se aporta evidencia a su favor. Si se refutan, se descartan en busca de mejores explicaciones y nuevas hipótesis. Al apoyar las hipótesis se genera confianza en la teoría que las sustenta. Si no es así, se rechazan las hipótesis y, eventualmente, la teoría”. Esto sugiere que esta investigación fue de tipo cuantitativa, ya que se realizó una investigación previa para luego hacer una hipótesis y luego se llegó a una conclusión para luego ser aplicada.

Según González (2003), “El estudio del conocimiento existente en un momento dado conduce a la formulación de nuevas hipótesis, en las cuales se interrelacionan variables, cuya medición cuantitativa, permitirá comprobarlas o refutarlas en el proceso

de investigación” esto hace muy positiva esta investigación y hace que se fundamente en la experimentación y la observación de fenómenos.

3.2 Tipo de Investigación

La investigación de tipo aplicada, es la forma en la que se desarrolló este trabajo, según Hurtado de B. (2008), en su publicación Metodología de la investigación, una comprensión holística dice que las investigaciones de tipo proyectistas “consisten en la elaboración de una propuesta, un plan, un programa o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, o de una región geográfica, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras, es decir, con base en los resultados de un proceso investigativo”.

Este trabajo estuvo proyectado bajo la premisa anterior ya que con el mismo se pretende hacer uso de un equipo que ya se encuentra instalado pero que no está en las mejores condiciones y que no se encuentra funcionando en la actualidad, se procura con este trabajo desarrollar un plan que pueda poner en funcionamiento la torre de enfriamiento así mismo un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para el mismo para preservar su funcionamiento por ello entra en el tipo de investigación aplicada.

3.3 Diseño de la investigación

La investigación documental, se caracteriza según Rodríguez U.(2013) “Por la utilización de documentos; recolecta, selecciona, analiza y presenta resultados coherentes; porque utiliza los procedimientos lógicos y mentales de toda investigación; análisis, síntesis, deducción, inducción, etc., porque realiza un proceso de abstracción científica, generalizando sobre la base de lo fundamental; porque supone una recopilación adecuada de datos que permiten redescubrir hechos, sugerir problemas, orientar hacia otras fuentes de investigación, orientar formas para elaborar instrumentos de investigación y elaborar hipótesis”.

Mientras que la investigación de campo Según el autor Martins F. (2010), “Consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar las variables. Estudia los fenómenos sociales en su ambiente natural. El investigador no manipula variables debido a que esto hace perder el ambiente de naturalidad en el cual se manifiesta”.

Este trabajo se realizó de manera documental y de campo ya que se observaron datos y variables directamente y luego se procesaron esos datos y se complementaron usando otras investigaciones y documentos, para realizar un resumen y un análisis y con ello se sacaron conclusiones y se realizó un plan de trabajo, para poner a punto la torre de enfriamiento y esa información antes suministrada se usó para trazar unas prácticas que puedan ser implementadas en el equipo.

3.4 Nivel de la Investigación

Según Tamayo y Tamayo M (2004). En su libro Proceso de Investigación Científica, la investigación descriptiva “comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupo de personas, grupo o cosas, se conduce o funciona en presente”.

El presente trabajo se realizó de manera descriptiva ya que en él mismo se describió de manera concisa los fenómenos que ocurren en una torre de enfriamiento, así como sus componentes, su funcionamiento y todo lo relacionado con ella, para que con esa información se realizaran procesos que ayudaron a sacar conclusiones que pueden ser útiles para su desempeño a futuro.

3.5 Población y Muestra

La población es el conjunto de individuos que se limitara y abarcara la investigación. Según Tamayo y Tamayo, (1997), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde la unidad de población posee una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación”.

Se concluye que una población es la suma de todas las cosas que comparten una serie de especificaciones determinadas por ejemplo un censo será el recuento de todos los elementos de una población.

En esta investigación la población estuvo comprendida en los 50.000 estudiantes, profesores, personal administrativo y obrero que hacen uso, trabajan y hacen vida en las instalaciones de la universidad Jose Antonio Páez.

La muestra es el conjunto de la población que se estudiara en la investigación, Se entiende por muestra al "subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible" (Ob. cit. p. 83). Es decir, representa una parte de la población objeto de estudio. De allí es importante asegurarse que los elementos de la muestra sean lo suficientemente representativos de la población que permita hacer generalizaciones.

La muestra de esta investigación fue tomada de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Jose Antonio Páez y de sus alumnos y profesores que comprenden unas 120 personas aproximadamente, ya que están más adyacentes a la torre de enfriamiento y son los que por tanto serán mayormente favorecidos con esta investigación ya que podrán hacer uso de la torre de enfriamiento en forma de prácticas y como equipo didáctico.

3.6 Fases Metodológicas

Se recolectará información referente a la instalación inicial de la torre (componentes, equipos, régimen de trabajo, comportamiento, requerimientos) así como información referente a otras torres que pueda complementar la información previamente descrita.

Primero se estudiara la instalación de la torre, sus componentes, sus medidas, el estado de la instalación y su régimen de trabajo directamente, tanto de la torre de enfriamiento como del circuito de caldera, se observara con detenimiento sus equipos, midiéndose si es necesario con aparatos de medición como cinta métrica, probando que se puedan encender para observar si tienen un funcionamiento correcto o no, a su vez se buscara los informes y archivos que se tenían en la Universidad si estos existieran y

y otros que lleven correlación con lo mismo, después de revisar toda esa información, se buscara de manera digital información bibliográfica de las torres de enfriamiento, para tener otro punto de vista de las torres de enfriamiento se buscaran varios trabajos de investigación y se revisaran y estudiaran con el fin de tener información detallada, de manera digital e impresa se buscara información referente a la marca de estas buscando más que todo catálogos de todos los componentes donde se detallen sus materiales partes y medidas, para complementar esto último se pretende visitar la empresa Rodelca marca de la torre de enfriamiento y donde se fabrican la mayoría de componentes de la misma donde los Ingenieros y trabajadores puedan proporcionar los detalles faltantes de los componentes y de la instalación de la Universidad ya que en su tiempo fueron clientes de la empresa.

Todo esto se hará con el fin tener toda la información prudente y necesaria para realizar un estudio completo del estado actual con datos numéricos como la temperatura de salida y de entrada y a su vez datos más palpables como el estado de la bomba, para posterior a esto realizar un análisis completo y exhaustivo de todo el proceso del equipo.

Luego de tener la información antes descrita en la fase I, se analizara la información y se evaluara de manera termodinámica con cálculos basados en datos numéricos como por ejemplo la temperaturas de operación y caudal de trabajo y luego de manera sistemática especificando los componentes de la torre, se hará un resumen de las condiciones actuales de la misma componente por componente y estas se compararan con las que se tenía cuando se instaló, para poder diagnosticar lo que está en estado operativo y lo que no y si en su totalidad la torre está en estado operativo o carece de condiciones para operar, Por ello se realizara un estudio de componentes y equipos donde se estudiara los diferentes componentes que comprenden toda la torre, Este estudio se realizara con la información recolectada directamente de la torre y la de los archivos y documentación que se obtendrán en la Universidad como la que se obtendrá de Rodelca y de manera digital, con esta información se podrá diagnosticar todos los equipos y así mencionar que equipos se tendrán que cambiar y los otros los

solo se tendrán que ajustar y/o aplicarles mantenimiento. En esta fase se alternara entre cálculos que reflejaran el funcionamiento ideal de la torre al momento de su instalación y su funcionamiento real, así como datos e información detallada de cada componente y su trabajo a realizar en él.

Después del análisis de funcionamiento de la torre se buscará la manera con la información previa, de mejorar el funcionamiento desarrollando propuestas, donde se estudiará los componentes que más influían en el desempeño total, los que más se necesitan cambiar y los que permitían hacer un cambio con mayor facilidad, después de la selección se recolectara y justificara dichos cambios con datos y cálculos que reflejen la mejoría de estos.

Fase IV Elaboración de prácticas de laboratorio: Después de realizadas las propuestas de mejoras, se investigara prácticas de laboratorio de manera digital y en otras universidades que posean laboratorios térmicos similares y donde se tenga torres de enfriamiento similares, se visitara su laboratorio de máquinas térmicas y se revisaran sus prácticas de laboratorio para luego analizarlas, para poder redactarlas, se redactara considerando el aprovechamiento máximo de la torre, considerando a los estudiantes, a los fenómenos termodinámicos y de transferencias de calor que complementando los conocimientos en el tema, también se tuvo en cuenta los equipos presentes en la torre, así como los que se necesitaban para hacer un practica de laboratorio, así como las materias del pensum en donde se podrán realizar. Con la información de suministrada digitalmente y de manera documental se trazarán las prácticas de laboratorio con sus objetivos y cuestionario a realizar.

Fase V Elaboración de plan de mantenimiento: Luego de tener el plan de mejora y el plan de acondicionamiento se trazara un plan de mantenimiento integral para hacer uso correcto de la torre de enfriamiento y garantizar su uso en un tiempo determinado, el mantenimiento tanto correctivo como preventivo de la torre se realizara con el fin de evitar daños en la misma, este plan de mantenimiento se hizo recolectando información del proveedor de la torre y de su ciclo de trabajo, así como un estudio de las necesidades de componentes, a su vez se visitara la planta Goodyear de Venezuela

donde se tienen tres torres de la marca Rodelca se observara los planes de mantenimiento y la documentación que posean acerca de las torres con el fin de complementar la información referente. Después de recoger esta información del mantenimiento de los componentes, se describió en detalle cada uno de los equipos que componen el sistema de enfriamiento de agua para llevar un registro organizado de los mismos.

CAPITULO IV RESULTADOS

Cumpliendo con los procesos metodológicos de esta investigación, se realizó los estudios y análisis de la torre de enfriamiento necesarios para la caracterización del trabajo de investigación, de allí se obtuvieron una serie de datos, que permitieron, por medio de estimaciones, cálculos, comparaciones y observaciones y así evaluar el equipo, en este capítulo se abordaran los datos y consideraciones para establecer los resultados del trabajo de investigación.

4.1 Estado actual de la torre

4.1.1 Ubicación de la torre

La torre de enfriamiento de tiro inducido en estudio se ubica en la universidad Jose Antonio Páez, al lado del edificio 5 y por detrás del edificio 4 (Ver figuras 26 y 27), esta fue instalada para abastecer de agua refrigerada a la caldera y al laboratorio de fluidos y maquinas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica, basándose en el proyecto que realizó el ingeniero Jordán Rodríguez en el año 2006, este se desconoce pero, estableció los parámetros a tomar en cuenta para la instalación de la torre(2007) y la selección de sus materiales y equipos, así como también su régimen de trabajo.



Figura 26. Ubicación de la torre de enfriamiento en la universidad

Fuente: Google maps (2017)

El caudal que maneja la torre de enfriamiento es de **15,9 m³/h** esto conoce gracias al trabajo de instalación de la misma que fue realizado por el Ingeniero Jordán Rodríguez en el año 2006, además del caudal el trabajo establece la marca y modelo de la misma, una **Rodelca 16/2-SG-1** respectivamente, sus temperatura de trabajo como la temperatura de agua caliente **40,8 C**, la temperatura de agua fría **29,7 C** y la temperatura de bulbo húmedo **25,6 C**, así como también el área que ocupa el equipo **1,6m²**. A su vez la marca sirvió para que se conociera los catálogos de Rodelca y se conocieron otros parámetros como: la estructura de la torre incluido el tanque de agua con todas sus conexiones de descarga, rebosadero, reposición y drenaje, está construido de poliéster reforzado con fibra de vidrio, auto-portante y anti-corrosivo, con protección contra rayos ultravioleta. Los ventiladores son de tipo axial, con aspas de perfil “air foil” desarrollados específicamente para ser aplicados en torres de enfriamiento. Las aspas del ventilador son fabricadas de plástico completamente, lo que ofrece una alta resistencia mecánica y resistencia corrosiva. Los cubos son fabricados en poliamidas. El motor eléctrico es de fabricación **WEG** o similar, de tipo jaula de ardilla, con grado de protección **IP 55 T. E. F. C**, con accionamiento directo del ventilador, modelo 16, potencia **3 HP**, velocidad 1150 rpm, conexión **220/440 V-3** fases. Las bombas son hechas en Italia por la marca Pedrollo, modelo PK300 con una potencia de 3 HP. Las especificaciones de diseño por ser un modelo 16 se encuentran en el catálogo suministrado por Rodelca (**Ver figuras 28 y 29**)



Figura 27. Localización de la torre de enfriamiento

Fuente: blanco (2017)

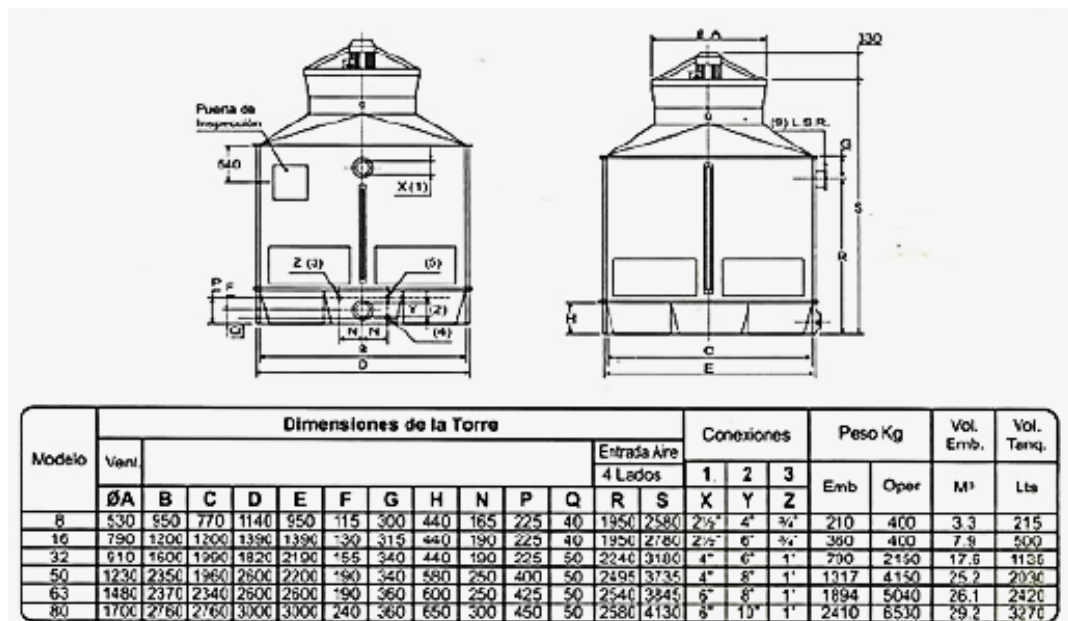


Figura 28. Catálogo de Torres de enfriamiento de 8-80.

Fuente: Rodelca (2000)

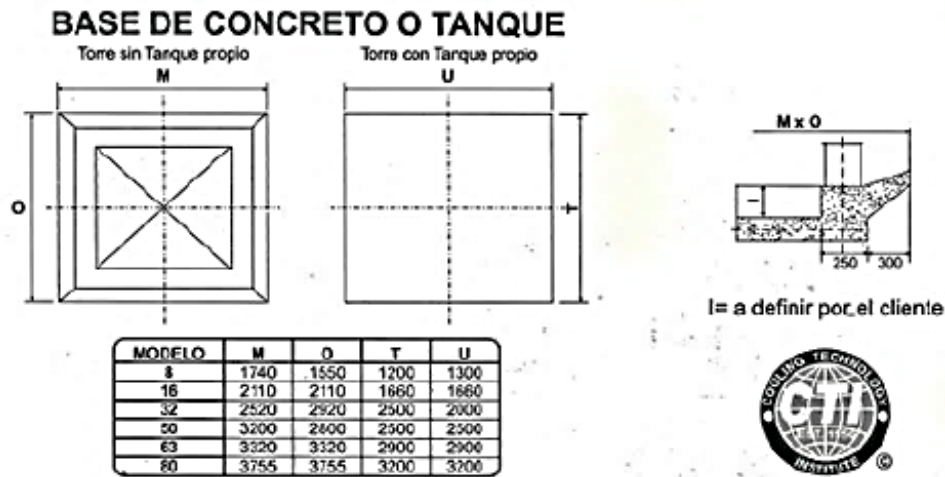


Figura 29. Catálogo de Torres de enfriamiento de 8-80.

Fuente: Rodelca (2000).

4.1.2 Componentes de la torre

Los componentes de la torre de enfriamiento Rodelca son los siguientes:

Carcaza

Totalmente construida en poliéster reforzado con fibra de vidrio, pigmentada en verde Rodelca, Auto-Portante con gran resistencia a la acción corrosiva del medio ambiente y condiciones del aire y agua que maneja, con tecnología de Alpina Equipamientos (Brasil), hecha en Venezuela por Rodelca.

Actualmente presenta cierto deterioro en su estructura y un desteñimiento ya que su color actual (Ver figura 30) es azul, además de esto la estructura si es de poliéster como se menciona anteriormente con pequeñas partes con grietas y quebradas, pero nada que afecte directamente su operatividad.

Tanque Colector

Construido también en poliéster reforzado con fibra de vidrio y pigmentado en verde Rodelca, es parte integrante de la estructura de la torre, en él se encuentran ubicadas las conexiones de succión, drenaje y sobre flujo, además del cribo de salida para evitar cavitación de las bombas, hecha en Venezuela por Rodelca con tecnología de Alpina Equipamientos (Brasil).

Este está hecho de poliéster, pero actualmente ha perdido su color verde característico, actualmente sus conexiones están operativas, pero por el descuido que en él se presenta, se ha ido llenando de agua con desechos sólidos disueltos y agua de lluvia y desechos orgánicos.



Figura 30. Partes visibles de la torre de enfriamiento.

Fuente: blanco (2017)



Figura 31. Instalación de la torre de enfriamiento.

Fuente: Blanco (2017)

Distribución de agua

Se realiza a presión a través de un tubo principal y ramales fabricados en PVC. con rociadores tipo RotoJet o RG en polipropileno inyectado, hecho por Rodelca con tecnología de Alpina Equipamientos (Brasil).

La distribución de agua se encuentra actualmente con rociadores de propileno inyectados, se desconoce su estado actual ya que el bombeo de agua hacia la torre no se logró debido a la falta de esta en el tanque.

Relleno de contacto tipo SG

Conformado por bloques de mallas inyectadas de polipropileno, con resistencia a temperaturas hasta 70 °C, y corrosión química, recomendado para el manejo de aguas polucionadas, y altos porcentajes de sólidos en suspensión, por su diseño semi-abierto, es lavable de fácil limpieza y de gran durabilidad.

Actualmente por el descuido que en ella se presenta, se ha ido llenando de agua de lluvia que con basura, desechos orgánicos y el polvo y el estancamiento en ese lugar se ha ido ensuciando.

Eliminadores de Arrastre

Del tipo doble paso, construidos en perfiles extruidos de P.V.C, unidos por separados de polietileno o en polipropileno inyectado, conformando paneles de fácil manejo, facilitando labores de mantenimiento, restringe la pérdida por arrastre hasta límites inferiores 0,01% del flujo de recuperación, hecha en Venezuela por Rodelca con tecnología de Alpina Equipamientos (Brasil).

Actualmente se presenta cierta suciedad, y se desconoce cuándo fue la última vez que se le realizó tareas de mantenimiento y limpieza.

Ventilador

Del tipo Axial totalmente en plástico o combinación de acero y plástico reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V), accionados directamente por motor eléctrico tipo T.E.F.C.

Actualmente está obstruido por una rama de un árbol que se encuentra sobre el mismo e impide su funcionamiento correcto además de esto presenta problemas eléctricos por el tiempo que ha durado sin ser encendido.

Bombas de agua caliente y agua fría:

Electrobombas con rodete periférico de la marca Pedrollo modelo PK300, hecha de hierro fundido con bocas de succión y descarga roscadas, soporte de motor en aluminio con inserto frontal en latón con aspas periféricas radiales, el eje del motor en acero inoxidable, el motor eléctrico es de la marca Pedrollo y está directamente acoplado a las bombas con unas dimensiones expresamente especificadas, además de que es silencioso, cerrado, con ventilación externa y apto para servicio continuo, las bombas son trifásicas con un voltaje de 220/440 V – 60 Hz y un amperaje de 9,2/5,5 A (Ver figuras 32 y 33).

Actualmente la bomba de agua fría no está instalada se desconoce dónde se encuentra, se desconoce si esta guardada o usándose en otro lado, sin embargo, la de agua caliente se encuentra en el laboratorio de fluidos del edificio de mecánica de la Universidad Jose Antonio Páez (C.E.I.M) es de la marca Pedrollo como antes se menciona y la misma se encuentra en buen estado.

4.1.3 Proceso de la torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento obtiene agua caliente mediante la caldera Continental ubicada en el laboratorio de fluidos de la Universidad Jose Antonio Páez, y a su vez la misma obtiene agua fría que antes de pasar por un tanque pasa por una serie de filtros, donde se combina con agua de alimentación que nutre el sistema de agua y compensa las pérdidas de agua por evaporación, después de esto es calentada nuevamente y comienza el ciclo nuevamente. (Ver figura 34).

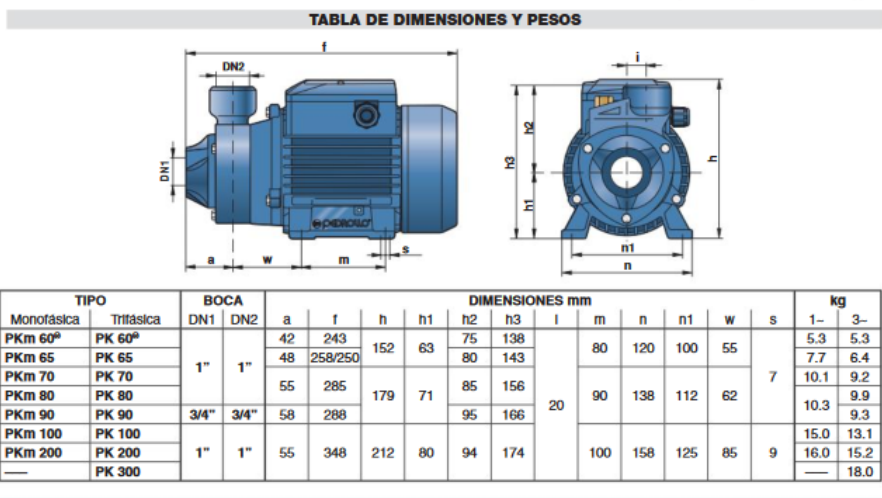


Figura 32. Catálogo de Pedrollo Dimensiones.

Fuente: Pedrollo (2017)

TIPO		POTENCIA		Q m ³ /h l/min	H m														
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	
PKm 60 [®]	PK 60 [®]	0.37	0.50	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90		
PKm 65	PK 65	0.50	0.70	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5							
PKm 70	PK 70	0.60	0.85	55	50	45.5	40.5	36	31	27	22	17	8						
PKm 80	PK 80	0.75	1	65	62	57	52	47	42	37	32	27	18						
PKm 90	PK 90	0.75	1	70	66	61	56	51	46	41	36.5	31	22						
PKm 100	PK 100	1.1	1.5	90	82	71	60	49	38	27	17	5							
PKm 200	PK 200	1.5	2	85	80	75	70	65	60	55	50	45	35	25	15				
—	PK 300	2.2	3	90	86	81	76	71	65.5	60	55	50	40	30	20	10			
—	—	—	—	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20	10		

Q – Caudal H – Altura manométrica total Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 App. A.

Figura 33. Catálogo de Pedrollo Caudales.

Fuente: Pedrollo (2017).

4.1.4 Resumen de estado actual

Actualmente la torre de enfriamiento no está en uso ni en condiciones para usarse, la estructura ha sufrido los embates de la naturaleza y el descuido y abandono, uno de sus principales problemas es la adyacencias de la torre donde se pueden encontrar arboles uno en específico está literalmente sobre la torre (Ver figura 31), al punto de que una de sus ramas está apoyada sobre la parte superior de la misma, el follaje que rodea la torre (Ver figura 35) tanto en el interior del recinto donde esta se encuentra ubicada como de los dos lados de las rejas que resguardan la misma, que dificultan la entrada al recinto.

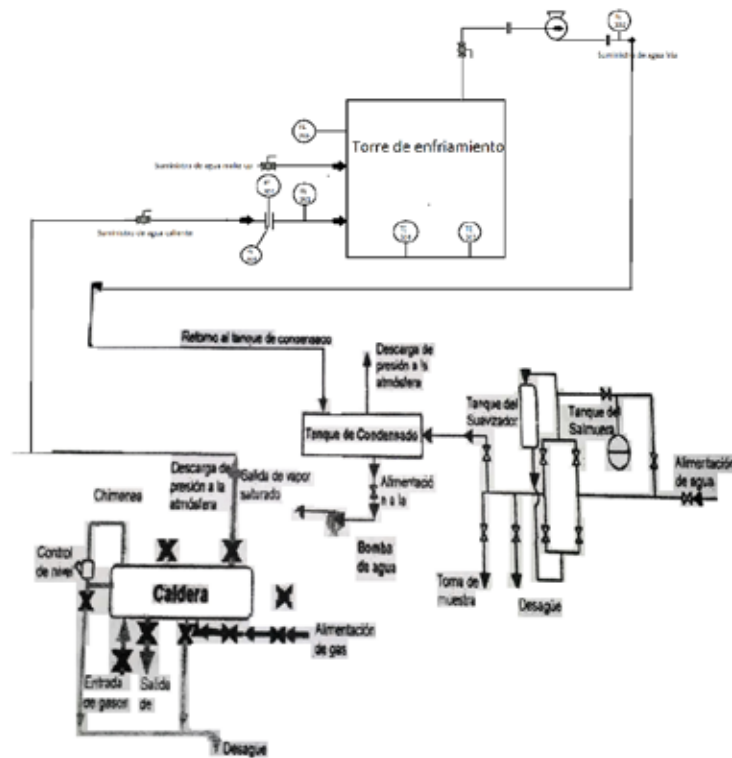


Figura 34. Diagrama de proceso del laboratorio de la Universidad José Antonio Páez.

La carcasa de la torre necesita un repintado tanto por fuera como por dentro, el tanque debe ser limpiado y extraer toda el agua que presenta suciedad del circuito, se debe cambiar el relleno de la torre y los eliminadores de arrastre ya que han superado ya su tiempo de instalación, el ventilador debe ser engrasado y hacerle mantenimiento al motor, se deben revisar exhaustivamente las tuberías ya que algunas están en avanzado estado de corrosión.



Figura 35. Estado actual de la torre de enfriamiento.

Fuente: Blanco (2017)

4.2 Evaluación termodinámica de la torre de enfriamiento

4.2.1 Especificación de la torre de enfriamiento

En el catálogo de Rodelca se encuentran las especificaciones de las torres de enfriamiento (Ver figura 36).

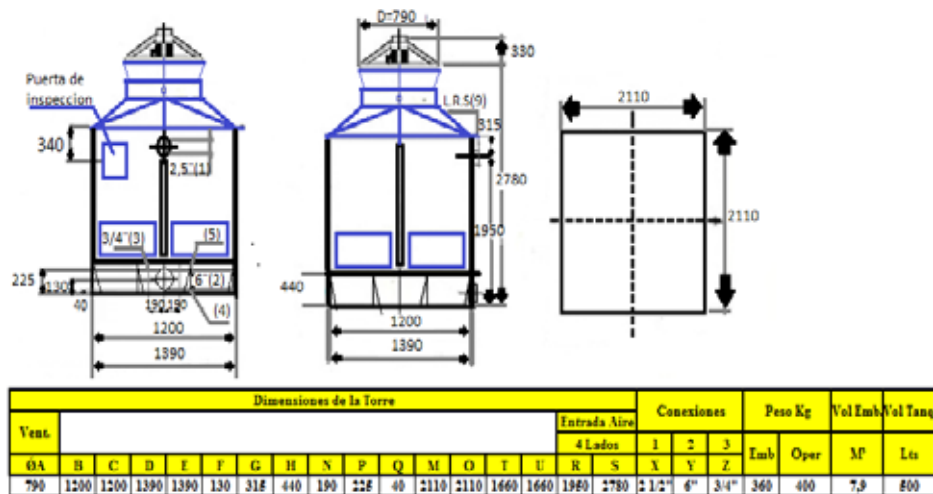


Figura 36. Catálogo de especificaciones de la torre de enfriamiento.

4.2.2 Datos de operación de la torre de enfriamiento obtenidos del trabajo de instalación de la torre por el Ingeniero Jordán Rodríguez a continuación tabla 3 parámetros de la torre de enfriamiento:

Tabla 2. Parámetros de operación de la torre de enfriamiento.

Parámetros	Numero
Caudal de agua	15,9m ³ /h
Temperatura de entrada del agua	40,8 C = 105,4 F =313,9 K
Temperatura de salida del agua	29,7 C =85,46 F=302,8 K
Temperatura de bulbo húmedo	25,6 C =85,46 F= 298,7 K
Temperatura de bulbo seco	35,25 C
Área ocupada por la torre	1,6m ²
potencia del ventilador	3HP
Velocidad de rotación del ventilador	1150rpm
Conexión del ventilador	220/440 V-3 fases.
Conexión de la bomba	220/440 V-3 fases.
Potencia de la bomba	3HP
Humedad relativa (Información digital)	51%
Temperatura de aire ambiente	26 C = 78,8 F= 299,1 K

Datos obtenidos del Trabajo de investigación torre de enfriamiento.

4.2.3 Cálculos de la torre

Calculando la masa del agua con la ecuación 26:

$$M_w = \frac{K_{aw}}{f(tw1)} = \left(\frac{15,9m^3/h}{1,0078 \times 10^{-3} m^3/kg} \right) \left(\frac{1h}{3600s} \right) = 4,3824 Kg/s$$

Calculando la masa del aire con la ecuación 27:

$$M_a = \frac{Q_a}{a}$$

Pero para ello se necesita el caudal del aire y para el caudal necesitamos su velocidad y la calculamos con la ecuación 11 donde el Radio del ventilador = r =0,395m (Ver Figura 36)

$$V_a = Nvr = 1150 rpm \left(\frac{360}{1 Rev} \right) \left(\frac{2\pi}{360} \right) \left(\frac{1m}{60s} \right) 0,395m = 47,569m/s.$$

Con la velocidad calculada se calcula el área transversal usando la ecuación 12 del área transversal de un ventilador:

$$Av = \pi r^2 = 1,24 m^2$$

Usando la ecuación 25 se calcula el caudal de un fluido:

$$Qa = VaAv = \left(\frac{47,569 m}{s} \right) (1,24 m^2) = 59,019 m^3/s$$

Con la velocidad calculada se usa la del gas ideal ecuación 29:

$$a = \frac{RT}{P} = \frac{0,287 KPa(m^3/kgK)299,15K}{101 KPa} = 0,85 m^3/kg$$

Usando la ecuación 27 de la masa del aire:

$$Ma = \frac{Qa}{a} = \frac{59,019 m^3/s}{0,85 m^3/Kg} = 69,434 kg/s.$$

Calculando el calor cedido entre los dos fluidos con la ecuación 56:

$$Q = (w)(Cpw)(Tw1 - Tw2) = (a)(Cpa)(Ta1 - Ta2)$$

$$Q = (4,38 Kg/s)(4,286 KJ/kgK)(40, \quad 29, \quad) = 203,515 KJ/s$$

Con la misma ecuación se calcula usando el calor, para despejar la temperatura del aire a la salida:

$$Q = (a)(Cpa)(Ta1 - Ta2)$$

$$Ta1 = \frac{Q}{Cpa} + Ta2 = \frac{\frac{203,515 kJ}{s}}{\left(\frac{69,434 kg}{s} \right) \left(\frac{1,012 kJ}{kg K} \right)} + 299,15 K =$$

$$302,046 K = 28,896$$

Calculando la eficiencia de una torre de enfriamiento, esta se calcula en base al rango de la torre y su aproximación y se calcula con la ecuación 60:

$$(\%) = \left(\frac{Rango}{Rango + Aproximacion} \right) 100 = \left(\frac{T_{w1} - T_{w2}}{T_{w1} - T_{bh}} \right) 100$$

$$(\%) = \left(\frac{40,8^\circ C - 29,7^\circ C}{40,8^\circ C - 25,6^\circ C} \right) 100 = 73,026\%$$

Esta eficiencia de 73,023% se pudiera decir que es alta ya que está muy por encima de la mitad, pero esta eficiencia es una eficiencia ideal no es la que tiene realmente ya que además de los equipos que no están en buenas condiciones, el caudal

de trabajo ($5,4\text{m}^3/\text{h}$) está por debajo del caudal de diseño de ($15,9\text{m}^3/\text{h}$) y esto genera un cambio en el proceso considerable.

4.2.4 Plan de acondicionamiento

Para que la torre de enfriamiento pueda funcionar correctamente se deben hacer una serie de arreglos en la instalación de la misma para garantizar su correcto funcionamiento, sobre todo en algunos componentes de la misma ya que no se encuentran en plenas condiciones y otros deben hacerle tareas de mantenimiento y repintado, a continuación, un listado de los arreglos que se deben hacer a la torre de enfriamiento para su correcta operación:

Carcaza: Se debe repintar por fuera y por dentro, por fuera con pintura ya que por los años se le ha caído y desteñido la pintura que la protege mientras que por dentro debe proteger con pintura epoxica para fibra de vidrio para evitar y prevenir la corrosión de la misma, esto se debe hacer cada 2 años.

Relleno de contacto SG y eliminadores: Estos dos componentes deben cambiarse cada 10 años ya que pierden eficacia por culpa de la suciedad por que esta se incrusta en las mismas, sobre todo estos que han estado tantos años sin mantenimiento, pero ya con 10 años de su instalación (2007) estos han cumplido su vida útil, por ello lo mejor es comprar unos iguales e instalarlos.

Ventilador y motor del mismo: las aspas del ventilador están en buenas condiciones, pero las mismas deben ser limpiadas, su motor y conexiones deben ser revisados exhaustivamente ya que no parece tener ningún problema, pero el mismo no encendió y según los fabricantes estos no deberían tener problemas, también para evitar inconvenientes se debe recortar las ramas del árbol, si es posible quitar todo el arbol circundante ya que este incide e impide en el funcionamiento del ventilador.

La distribución del agua y el tanque colector: Ambos se encuentran en buenas condiciones, aunque la distribución de agua no se pudo probar ya que al encender la bomba de agua esta no impulso agua por no haber agua para impulsar en el circuito, se deben limpiar ambos para su uso.

Bombas de agua: se debe seleccionar una nueva bomba de agua fría ya que la misma no está en la instalación ni en ningún lugar que se conozca de la Universidad y se plantea una selección nueva de la bomba de agua caliente ya que esta no cumple con el caudal requerido determinado en la instalación que es de 15,9 m³/h y el intervalo de caudal de la bomba según su catálogo (Ver figura 33) es de 0 a 5,4 m³/h, por ende estas bombas no pueden impulsar el caudal necesario de la torre.

Instalación y alrededores de la torre: para un mejor funcionamiento de la torre, se debe talar el árbol adyacente a la misma o por lo menos las ramas más cercanas ya que disminuyen el flujo de aire con el ambiente, que es importante para la transferencia de calor que se da en la torre entre el agua y el aire, mientras que el recinto alrededor de la torre se debe limpiar y podar las plantas adentro de la misma y a su alrededor para que se pueda visitar la torre y se puedan hacer las prácticas de laboratorio y las demás tareas de mantenimiento y reparación.

4.2.5 Recalculo real de la torre de enfriamiento

Aprovechando la falta de la bomba de agua fría que no está en el circuito, y la bomba de agua caliente que no posee la capacidad para impulsar el caudal necesario en el sistema, se realizara el cálculo anterior con el caudal de 5,4m³/h este sufriría cambios sobre todo una baja resaltable de eficiencia, este cálculo se muestra a continuación:

Calculando la masa del agua con el caudal máximo de agua: 5,4 m³/h según el fabricante (**Ver figura 33**) por eso usamos este caudal y con la ecuación 26:

$$M_w = \frac{K_{aw}}{f(tw1)} = \left(\frac{5,4m^3/}{(1,0078) 10^{-3}m^3/kg} \right) \left(\frac{1}{3600s} \right) = 1,4884kg/s$$

Calculando la masa del aire esta se mantiene igual

$$M_a = 69,434 \text{ kg/s.}$$

Calculando el calor cedido entre los dos fluidos se calcula con la ecuación de transferencia de calor donde se evaluará, la transferencia de calor por convección interna, conducción a través de la pared y convección en externa (**Ver figura 37**)

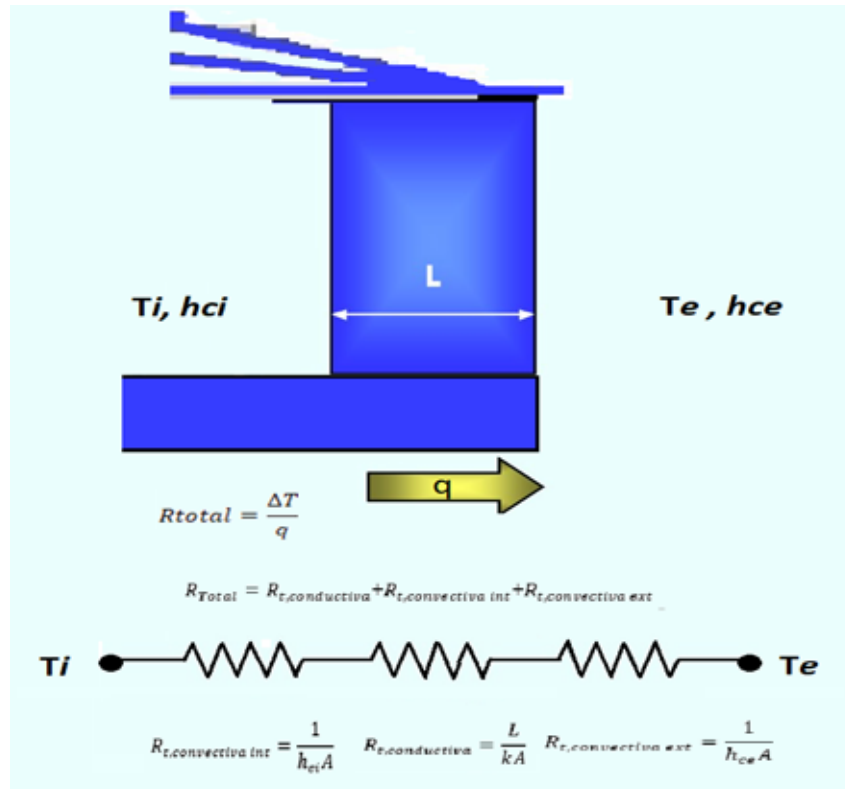


Figura 37. Análisis de transferencia de calor en la torre de enfriamiento.

: Blanco

La resistencia térmica se define como la relación entre el potencial de flujo a la correspondiente tasa de transferencia de calor y se calcula de la ecuación 3:

$$R_{Total} = \frac{T}{Q}$$

Donde la R_{Total} se calcula con la ecuación 4:

$$R_{Total} = R_{t,conductiva} + R_{t,convectiva\ int} + R_{t,convectiva\ ext}$$

Y las resistencias individuales se calculan con las ecuaciones 5 y 6:

$$R_{t,conductiva} = \frac{L}{kA}$$

$$R_{t,convectiva\ int} = \frac{1}{ciA}$$

$$R_{t,convectiva\ ext} = \frac{1}{ceA}$$

Estos datos se sacan de las tablas de conductividad térmica(k) y de h convectivo (Ver figuras 38 y 39):

Plata: 419	MgO: 2,5
Cobre: 194-391	Mullita: 2,5
Grafito: 40-187	Vidrio: 2-3
Oro: 298	Sílice: 1,4
Aluminio: 222-234	Oxido Zirconio: 1
Nitruro de boro: 182	Epoxi: 0,2-0,5
Wolframio: 167	Poliamida+30%FV: 0,2-0,5
Al. de Zinc: 109-125	Maderas: 0,4
Al. de Magnesio: 42-100	ABS: 0,15-0,35
WC: 28-88	Acetato de celulosa: 0,17-0,33
Al. de Niquel: 10-86	Polietileno: 0,33
Fundiciones grises: 43-52	Polipropileno: 0,25
Aceros dulces: 46-47	Poliamidas: 0,17-0,24
SiC: 15-43	Policarbonato+40%FV: 0,22
Aceros inox.: 20-36	Poliester+30%FV: 0,19
Nitruro Silicio: 14-33	Goma natural: 0,14
Al. Zirconio: 14-17	Espumas plásticas: 0,02-0,13
CaO: 7	Lana: 0,05

Figura 38. Conductividad térmica de diferentes materiales.

Medio	Coefficiente de transferencia de calor h (W/m ² . K)
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Figura 39. Coeficiente de transferencia de calor h.

Se calcula entonces el R conductiva, con las k de poliéster y fibra de vidrio y el área de la pared de la torre (Ver figura 36) donde la base 1,39m y la altura 2,265m con la altura y la pared de la parte de arriba de 0,525 m y la altura de 0,79m con la ecuación:

$$A = 4 \left[[(1,39m)(2,265m)] + [(0,515m)(0,79m)] \right] + [(1,39m)(1,39m)] - \pi(0,395m)^2 = 14,221m^2$$

$$R_{t,conductiva} = \frac{L}{kA} = \frac{0,05m}{\left(\frac{1,02W}{mK}\right) 15,663m^2} = 9,389 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W} = 0,9389K/kW$$

Ahora se calcula la R convectiva interna, donde la h sería por convección forzada de vapor y agua y el área transversal de la torre (Ver figura 36) donde la base 1,2m y el ancho de 1,2m con la ecuación 6, pero desestimando el grosor de la pared:

$$A = 1,15m \cdot 1,2m = 1,38m^2$$

$$R_{t,convectiva\ int} = \frac{1}{\left(\frac{100000W}{m^2K}\right) 1,38m^2} = 7,246 \cdot 10^{-6} K/W = 7,634 \cdot 10^{-3} K/kW$$

Ahora se calcula la R convectiva externa, donde la h sería por convección natural del aire y el área transversal circundante a la torre donde se puede suponer una base de alrededores de: 4m y el ancho de la misma 4m con la ecuación 6:

$$A = 5m \cdot 5m = 25m^2$$

$$R_{t,convectiva\ ext} = \frac{1}{\left(\frac{300W}{m^2K}\right) (25m^2)} = (1,333) \left(10^{-4} \frac{K}{W}\right) = 0,0133K/kW$$

Con las resistencias calculadas se procede a calcular la resistencia total con la ecuación 4:

$$R_{Total} = \frac{0,939 K}{kW} + \frac{(7,634)(10^{-3} K)}{kW} + \frac{0,0133 K}{kW} = \frac{0,96 K}{kW}$$

Con las resistencias totales se puede calcular el calor total con la ecuación 3:

$$R_{Total} = \frac{T}{q}$$

$$q = \frac{T}{R_{Total}} = \frac{40,8^{\circ}C - 26^{\circ}C}{0,96K/kW} = 15,417kW$$

Con el calor calculado se puede calcular la temperatura de salida de la torre con la ecuación 55:

$$Q = (Cpw)(\dot{m})(T_{w1} - T_{w2})$$

$$T_{w2} = \left(\frac{Q}{Cpw \dot{m}} + T_{w1} \right) = \left(\frac{15,417 \text{KW}}{\frac{1,4884 \text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,286 \text{KJ/kg}} + 313,95 \text{K} \right) = 311,533 \text{K} \quad 38,$$

$$T_{a1} = \frac{Q}{\dot{m}_a C_{pa}} + T_{a2} = \frac{15,417 \text{KW}}{\frac{69,434 \text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,012 \text{KJ/kg}} + 299,15 \text{K} = 299,369 \text{K} = 26,$$

Calculo de eficiencia de una torre de enfriamiento se calcula con la ecuación 60:

$$(\%) = \left(\frac{\text{Rango}}{\text{Rango} + \text{Aproximacion}} \right) (100) = \left(\frac{T_{w1} - T_{w2}}{T_{w1} - T_{bh}} \right) 100$$

$$(\%) = \left(\frac{313,95 \text{K} - 311,533 \text{K}}{313,95 \text{K} - 298,75 \text{K}} \right) (100) = 15,9\%$$

Con este cálculo se observó una baja de eficiencia considerable y preocupante de 73% a 15,9%, esta baja de eficiencia (Ver gráfico 1) es causada por el bajo caudal de la bomba por esto sería prudente para mejorar el proceso de enfriamiento que se seleccione una bomba para la línea de agua caliente y aprovechando que la línea de agua fría tampoco tiene bomba, se seleccionara dos bombas para el circuito de la torre.

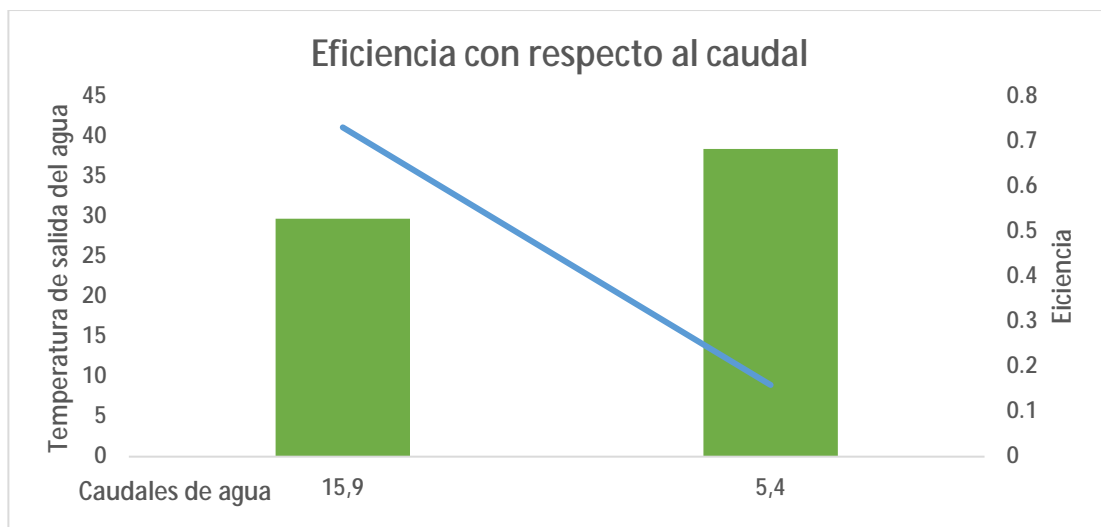


Gráfico 1. Gráfico de temperaturas de salida del agua y eficiencia vs caudales de agua.

4.2.6 Propuesta de mejora selección de dos nuevas bombas

Para seleccionar una bomba se debe calcular la disponibilidad en las tuberías como primer paso para ello se debe conocer el plano de las tuberías (Ver figuras 40 y 41), en esta se denota las longitudes y diámetros:

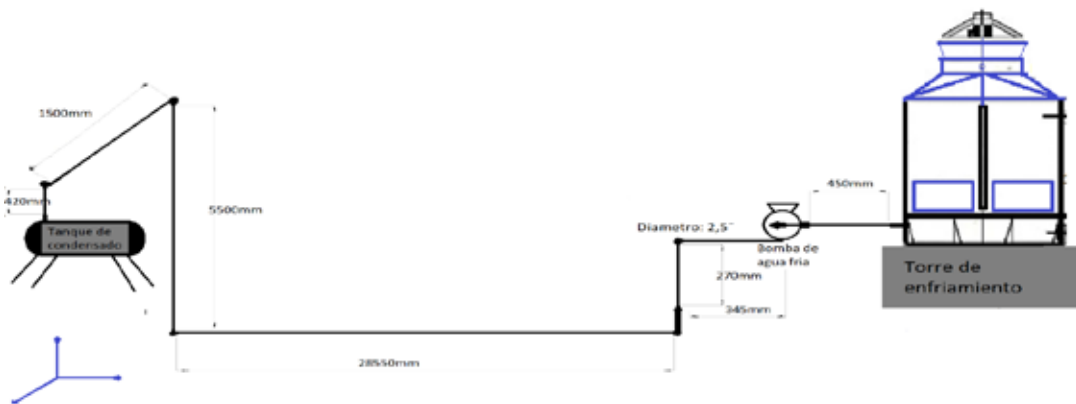


Figura 40. Diagrama de las tuberías de la torre de Enfriamiento línea de agua fría.

Calculo de disponibilidad de la tubería de agua fría, con la ecuación 31 se puede estimar la disponibilidad en un punto, punto 1:

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

Para calcular la disponibilidad se necesita la velocidad (V) de la tubería para ello se emplea la ecuación 25:

$$Q = V A$$

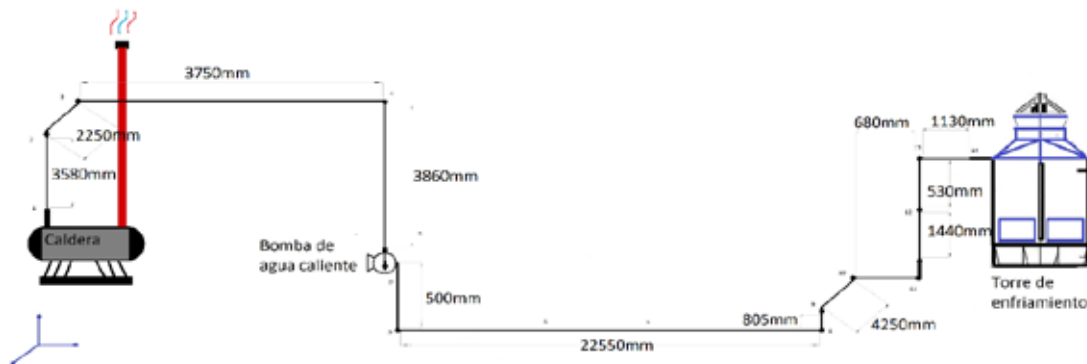


Figura 41. Especificaciones de las tuberías de la torre de Enfriamiento agua caliente.

Despejando la velocidad:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Se necesita el área de la tubería, para ello se necesita el diámetro interno que se obtiene en la figura 42 con el diámetro nominal de las tuberías, con esto se obtiene el diámetro= 70,35mm, y la densidad se obtiene con la figura 43. Con esto se procede a calcular el área transversal de la tubería con la ecuación 32:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(70,35\text{mm})^2}{4} = 3887,032\text{mm}^2 = (3,89)(10^{-3}\text{m}^2)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \left(\frac{15,9\text{m}^3/\text{h}}{(3,89)(10^{-3}\text{m}^2)} \right) \left(\frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) = 1,14\text{ m/s}$$

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 0,27 + \frac{(1,14\text{m/s})^2}{(2)(9,81\text{m/s}^2)} = 0,336\text{ m.c.a}$$

Calculando la presión de un tanque con la ecuación 61:

$$P_{\text{Tanque}} = P_{\text{atm}} + [(\rho)(g)(H)] = (995,7\text{kg/m}^3)(9,81\text{m/s}^2)(1,5\text{m}) = 14651,726\text{Pa} = 14,652\text{KPa}$$

La altura manométrica en el punto 2 se calcula con la ecuación 31:

$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{14,652\text{KPa}}{9,7615\text{Kn/m}^3} + 5,08 = 6,581\text{ m.c.a}$$

Diámetro Nominal Pulg. Mm	Diám. Ext. D mm	Diám. Interior mm	Espesor I mm	Peso kg/m	Area cm ²	Momento de Inercia cm ⁴	Modulo de Sección cm ³	Radio de Giro cm	No. de Cédula	
2 1/2 64	73	70.35	2.65	4.707					30	
	73	63	5.2	8.6	11.0	63.7	17.4	2.4	40	
	73	59	7.0	11.4	14.5	80.1	21.9	2.3	80	
	73	54	9.5	14.9	19.0	97.9	26.8	2.3	160	
3 76	89	85.96	3.04	6.705					30	
	89	78	5.5	11.3	14.4	126	28.3	3.0	40	
	89	74	7.6	15.3	19.5	162	36.5	2.9	80	
	89	67	11.1	21.3	27.2	210	47.2	2.8	160	
3 1/2 89	102	90	5.7	13.6	17.4	199	39.2	3.4	40	
	102	85	8.1	18.6	23.8	261	51.5	3.3	80	
	4 102	114	110.96	3.04	8.524					30
		114	102	6.0	16.1	20.6	301	52.7	3.8	40
114		97	8.5	22.3	28.5	400	70.0	3.8	80	
114		92	11.1	28.3	36.1	485	84.8	3.7	120	
5 127	114	87	13.5	33.6	42.9	552	96.7	3.6	160	
	141	128	6.6	21.8	27.8	631	89.3	4.8	40	
	141	122	9.5	30.9	39.5	860	121.8	4.7	80	
	141	116	12.7	40.3	51.5	1071	151.8	4.6	120	
6 150	141	110	15.9	49.0	62.6	1250	177.0	4.5	160	
	168	163.45	4.55	18.41					30	

Figura 42. Diámetros de tuberías interna y externas.

Calculo de pérdidas de la tubería de agua fría, para ello se debe primero estimar el régimen en el que se encuentra el flujo de agua, con la ecuación 33:

$$Re_{d-2} = \frac{VD}{\nu}$$

Siendo ν la viscosidad cinemática del agua a la temperatura del tramo de descarga en este caso que se acercaría a la temperatura ambiente, suponiendo 25 °C y buscando en la tabla de densidad y viscosidades (Ver figura 43):

$$\frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right) (0,07035m)}{\left(\frac{0,8m^3}{s}\right) 10^{-6}}$$

$$=100248,75 > 10000 \quad \text{Regimen completamente turbulento.}$$

Con esto se procede a calcular $\frac{\epsilon}{D}$, siendo D el diámetro y rugosidad ϵ que se obtiene con la tabla dentro de la figura 20 donde se busca el tipo de material, que es hierro galvanizado, para entonces calcular:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,15mm}{70,35mm} = (2,13) 10^{-3}$$

Temperatura T (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Módulo elasticidad K·10 ⁻⁹ (N/m ²)	Viscosidad dinámica $\mu \cdot 10^3$ (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Tensión superficial σ (N/m)	Presión de vapor P_s kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,140	0,0735	1,70
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	971,8	2,20	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,10
100	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33

Figura 43. Densidades y otras propiedades del agua a diferente temperatura.

Entonces el f de Darcy es 0,0232(Ver figura 44) se repite los pasos anteriores para la línea de succión de la bomba, donde al igual que la viscosidad anterior se busca en la tabla de densidades y viscosidades (Ver figura 43) esta vez a la temperatura de salida del agua Tw2 que es 29,7 30 se obtiene con la misma ecuación la 33:

$$Re_{1-s} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right) (0,07035m)}{\left(\frac{0,893m^2}{s}\right) 10^{-6}}$$

=89808,511 > 10000 Regimen completamente turbulento.

Con esto se procede a calcular $\frac{\varepsilon}{D}$, siendo D el diámetro y rugosidad ε la misma que las anteriores $\frac{\varepsilon}{D} = 2,13 \times 10^{-3}$, entonces f : 0,0238 (Ver figura 41) con los factores de los dos tramos calculados se puede aplicar la ecuación, donde se calculan las pérdidas por fricción por tramo de tuberías:

$$Hf = f\left(\frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g}$$

Para el tramo 1-s se calculan las pérdidas primarias con la ecuación 38:

$$Hf_{1-s} = 0,0238 \left(\frac{0,45m}{0,07035m}\right) \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,01m. c. a$$

Para el tramo d-2 se calculan las pérdidas primarias con la ecuación 38:

$$Hf_{d-2} = 0,0232 \left(\frac{36,585m}{0,07035m}\right) \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,799m. c. a$$

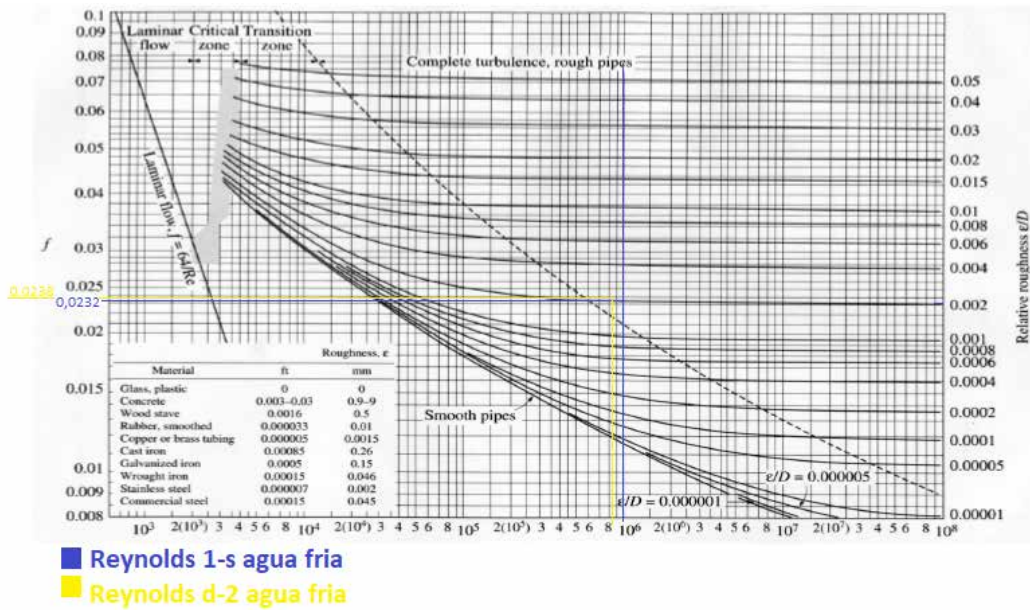


Figura 44. Diagrama de Moody con los cálculos de los factores de fricción de Darcy agua fría.

A su vez esto se le debe sumar las pérdidas por accesorios, para el cálculo de las pérdidas de accesorios por tramos se usa la ecuación 40:

$$Hm = Ka \frac{V^2}{2g}$$

Para el tramo 1-s, se tiene solo una entrada de fluido con la tabla de los k de las tuberías (Ver figura 43)

$$Hm_{1-s} = (2,75) \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,18m. c. a$$

Para el tramo d-2 se tiene dos codos cortos, dos codos normales. 3 válvulas de empalme, una válvula de pie, una entrada o salida extendida y una válvula de retención con esto se buscan los Ka por cada accesorio (Ver figura 45) y se procede a calcular con la misma ecuación 40:

$$\begin{aligned}
 Hm_{d-2} &= [5(0,4) + 2(0,90) + (1,75) + (1) + (2,5)] \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = \\
 &= 0,599 m. c. a
 \end{aligned}$$








PIEZAS QUE PRODUCEN PÉRDIDA	K	PIEZAS QUE PRODUCEN PÉRDIDA	K
Ampliación gradual 	0,30	Medidor tipo Venturi	2,50
Entrada 	2,75	Reducción gradual 	0,15
Válvula de compuerta abierta	2,50	Válvula de globo en ángulo abierta	5,00
Medidor de caudal	2,50	Válvula de corte abierta	0,20
Codo corto de 90°	0,90	Válvula de globo abierta	10,0
Curva de 90°	0,40	Tee, con pasada directa 	0,15
Curva de 45°	0,20	Tee, con pasada lateral 	1,5
Codo de 45°	0,75	Tee, con salida lateral 	2
Tolva	0,40	Tee, con salida bilateral 	3
Curva de 22,5°	0,10	Válvula de pié	1,75
Entrada extendida	1,00	Válvula de retención	2,50
Entrada normal en un canal	0,50	Ampliación brusca	0,90
Empalme	0,40	Pequeña derivación	0,03

Figura 45. Valores de K_a , obtenidos experimentalmente.

Sumando las pérdidas totales por tramo se calculan con la ecuación 41:

$$l = f + m$$

Para el tramo 1-s:

$$l_{1-s} = Hf_{1-s} + Hm_{1-s} = 0,01m. c. a + 0,18m. c. a = 0,19 m. c. a$$

Para el tramo d-2:

$$l_{d-2} = Hf_{d-2} + Hm_{d-2} = 0,799 m. c. a + 0,599m. c. a = 1,398 m. c. a$$

Con las pérdidas por tramo se calculan los H_{suc} y H_d con las siguientes ecuaciones 42 y 43:

$$H_{suc} = H_1 \quad L \text{ de succion}$$

$$H_{suc} = H_1 \quad L \text{ de succion} = 0,366m. c. a \quad 0,19m. c. a = 0,176m. c. a$$

$$H_d = H_2 + \quad L \text{ de descarga}$$

$$H_d = H_2 + \quad L \text{ de descarga} = 6,581 m. c. a. + 1,398m. c. a = 7,979m. c. a$$

Con esto calculado pasamos a calcular la altura de la bomba con la ecuación 44:

$$H_b = H_d \quad H_{suc}$$

$$H_b = 7,979 m. c. a \quad 0,176 m. c. a = 7,803 m. c. a.$$

Con la altura de la bomba y el caudal se puede proceder a seleccionar una bomba adecuada con una familia de curvas, en este caso se seleccionó con las bombas de la KSB, entre la familia de curvas del catálogo se seleccionó la KSB 32-160 a 1750

rpm, porque se adapta más a nuestro punto de trabajo (15,9m³/h y 7,803 m.c.a). En la curva KSB 32-160 (Ver figura 46) se ubica nuestro punto de trabajo:

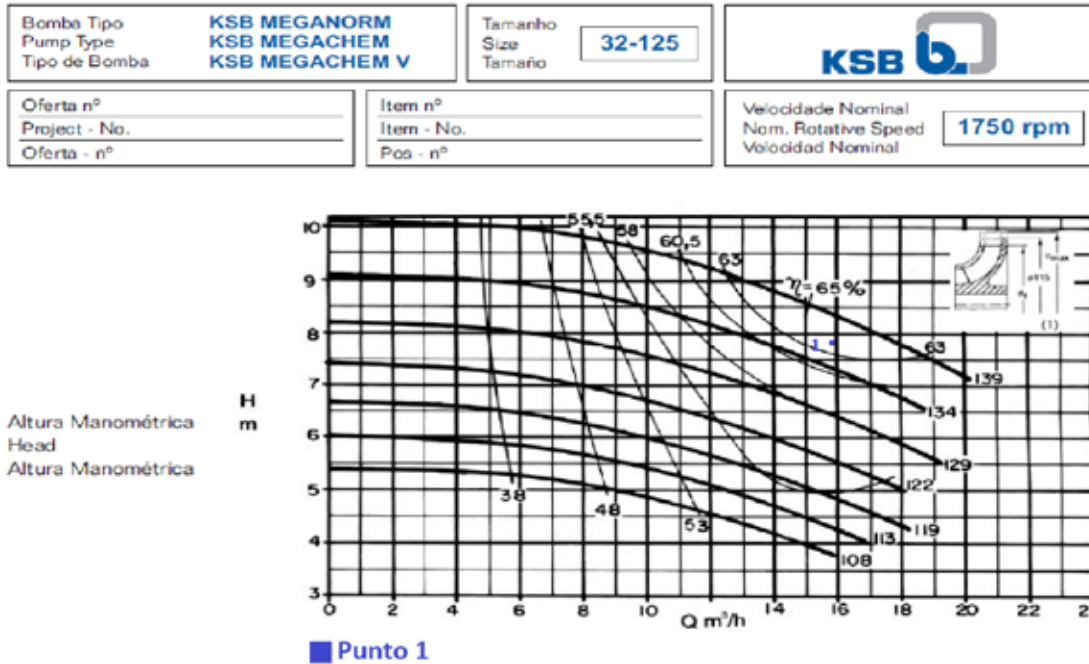


Figura 46. Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm Punto 1 agua fría.

Con esto se procede a calcular la parábola de isoeficiencia para calcular un punto de la curva donde la eficiencia sea la misma que nuestro punto 1, usando la ecuación 53:

$$K_{hq} = \frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{7,803 \text{ m.c.a}}{(15,9 \text{ m}^3/\text{h})^2} = 0,0309$$

$$H_2 = 0,0309 Q_2^2$$

Asignándole valores a Q para obtener valores de H (Ver tabla 3) a continuación tabla 3 Q vs H parábola de isoeficiencia:

Tabla 3. Recolección de datos

Q(m³/h)	14	16	18
H (m.c.a)	6,1	7,9	10

Datos Recopilados.

Con esto calculado se procede a trazar la parábola de isoeficiencia en la curva para encontrar el punto antes mencionado en la intercepción entre la parábola de isoeficiencia y la curva a 139mm de diámetro y eficiencia constante que se llamara punto 2 (Ver figura 47).

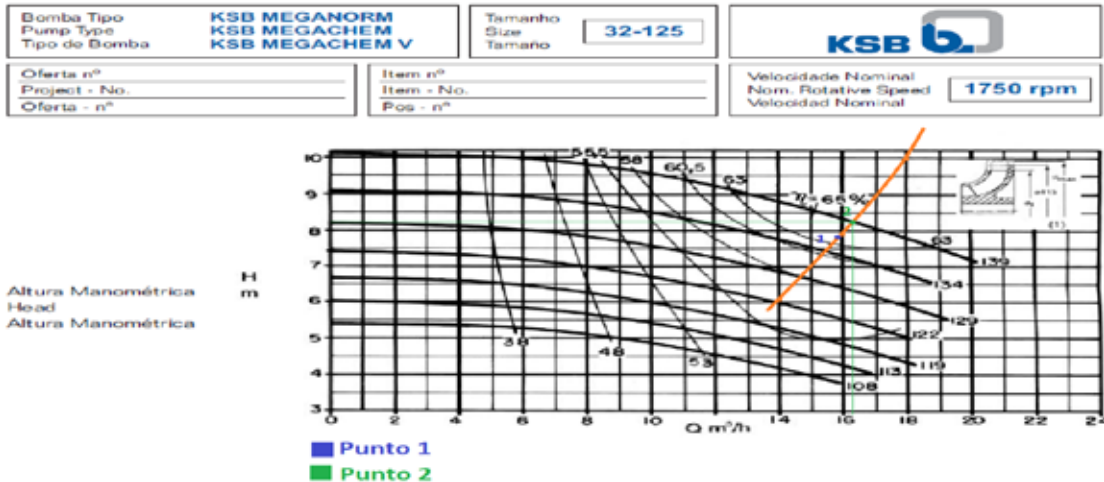


Figura 47. Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm, parábola de isoeficiencia agua fría.

Con el punto 2 (16,25 m³/h y 8,16 m.c.a), se procede a calcular con las reglas de semejanza el diámetro del punto 1 para posterior calcular el porcentaje de recorte, la ecuación 49 permite el cálculo del diámetro:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

Se despeja el diámetro 1 y se toma que las velocidades de rotación son las mismas:

$$D_1 = (D_2)^3 \sqrt[3]{\frac{Q_1}{Q_2}} = (139mm)^3 \sqrt[3]{\frac{15,9m^3/h}{16,25 m^3/h}} = 137,995mm$$

Ahora se calcula con la altura con la ecuación 50:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

$$D_1 = (D_2)^2 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = (139mm)^2 \sqrt{\frac{7,803m}{8,16m}} = 135,925mm$$

Ahora se calcula el porcentaje de recorte al que se debe someter el rodete para poder trabajar con el punto de trabajo, se usara para este cálculo el diámetro menor que en este caso es el de 135,925mm ya que si, con este diámetro el porcentaje de recorte da menor a 10% el otro también lo hará, con la ecuación 52.

$$\%deRecorte = \left(\frac{D_2 - D_1}{D_2} \right) 100\% = \left(\frac{139mm - 135,925mm}{139mm} \right) 100\% = 2,21\%$$

El 2,21% es menor que 10% entonces si se puede reducir el tamaño del rodete, pero seleccionamos el diámetro de 137,995mm, ya que con este se reduce el diámetro menos y conduce a menos gastos económicos. La potencia de la bomba se calcula con la ecuación 51, pero primero se debe usar el punto de trabajo 2 para estimar un punto en la curva de la potencia, la potencia del punto 2 0,88 hp (Ver figura 48):

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5$$

$$P_1 = P_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 = 0,88 \left(\frac{137,955mm}{139mm} \right)^5 = 0,88 \text{ hp}$$

Al igual que la potencia el NPSH se puede calcular con la ecuación 54 y buscando en la figura 45 el valor del $NPSH_2$:

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$NPSH_1 = NPSH_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = 2,35m \left(\frac{137,955mm}{139mm} \right)^2 = 2,315m$$

Con todo calculado se puede estimar que el diámetro de 137,955mm, una potencia de 0,847hp, un caudal de 15,9 m³/h, altura de la bomba 7,803 m.

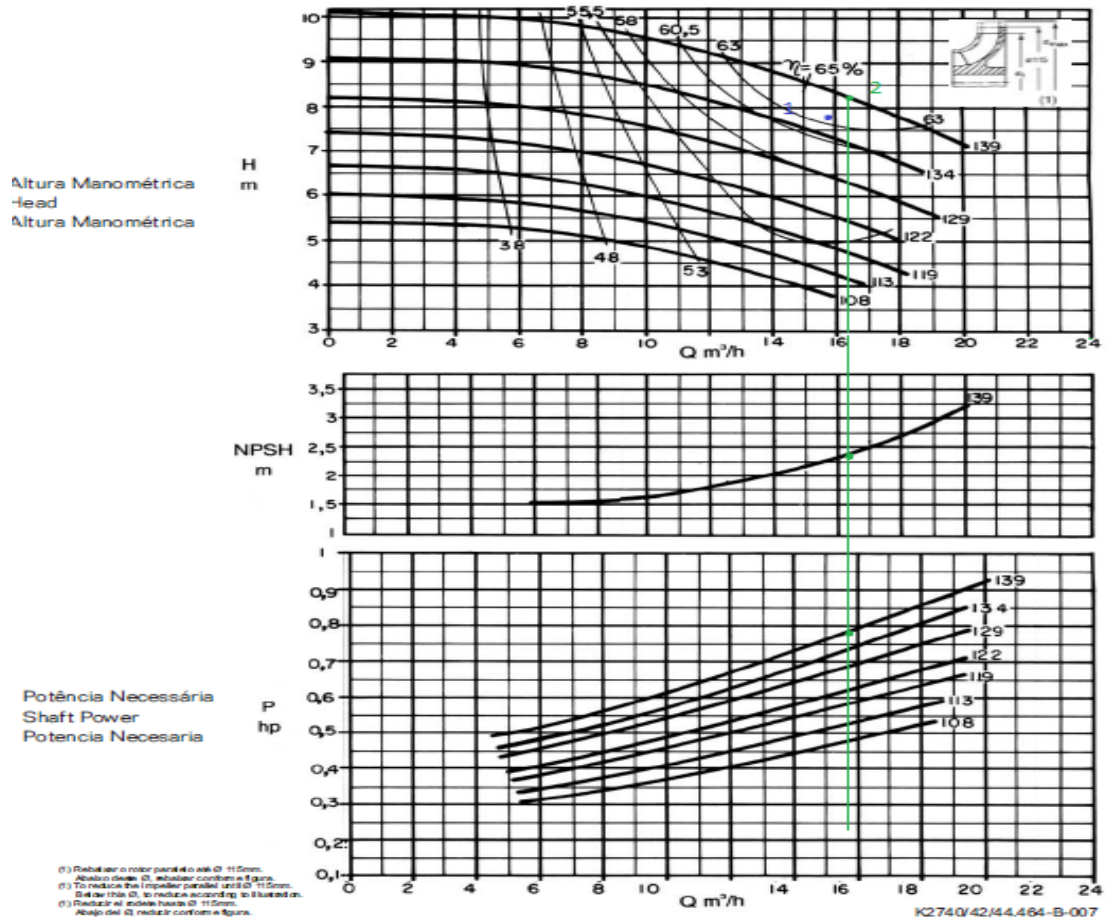


Figura 48. Curva de manual KSB, 32-125 a 1750 rpm y potencia agua fría.

Calculo de disponibilidad de Bomba de agua caliente (Ver figura 41), con la ecuación 31 se puede estimar la disponibilidad en un punto, punto 1

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

Para calcular la disponibilidad se necesita la presión de la caldera, el área de la tubería que es la misma ya que el diámetro = 70,35mm se mantiene, $3,89 \cdot 10^{-3} m^2$.
Con la ecuación 61:

$$P_{Tanque} = P_0 + (\rho)(g)(h) = 101Kpa + \frac{\left(\frac{958,4kg}{m^3}\right)\left(\frac{9,81m}{s^2}\right)(1m)}{1000} = 110,402kPa$$

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{110,402kPa}{9,438kN/m^3} + 0,5m.c.a = 12,198 m.c.a$$

$$P_{Tanque} = P_0 + (\rho g h) = 101kPa + \frac{(992,2kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2 \cdot 2,775 m)}{1000} = 128,01kPa$$

$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{128,01kPa}{9,7375kN/m^3} + 2,775 = 15,921 m.c.a$$

Calculo de pérdidas de la tubería de agua fría, para ello se debe primero estimar el régimen en el que se encuentra el flujo de agua, con la ecuación 33:

$$Re_{d-2} = \frac{VD}{\nu}$$

Siendo ν la viscosidad del agua a la temperatura del tramo de descarga en este caso que se acercaría a la temperatura ambiente, suponiendo 40 °C y buscando en la tabla de densidad y viscosidades (Ver figura 43):

$$Re_{d-2} = \frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right) (0,07035m)}{\left(\frac{0,658m^2}{s}\right) 10^{-6}} =$$

$$= 121882,979 > 10000 \quad \text{Regimen completamente turbulento.}$$

Con esto se procede a calcular $\frac{\epsilon}{D}$, siendo D el diámetro y rugosidad ϵ que se obtiene con la tabla dentro de la figura 20 donde como se mantiene el material y el diámetro $\frac{\epsilon}{D}$: $2,13 \cdot 10^{-3}$. Entonces el f de Darcy es 0,024 (Ver figura 49) se repite los pasos anteriores para la línea de succión de la bomba, donde al igual que la viscosidad anterior se busca en la tabla de densidades y viscosidades (Ver figura 43) esta vez a la temperatura de salida del vapor de la caldera que es 100 °C, se obtiene con la misma ecuación la 33:

$$Re_{1-s} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right) (0,07035m)}{\left(\frac{0,294m^2}{s}\right) 10^{-6}} =$$

$$= 272785,714 > 10000 \quad \text{Regimen completamente turbulento.}$$

Con esto se procede a calcular $\frac{\epsilon}{D}$, siendo D el diámetro y rugosidad ϵ la misma que las anteriores $\frac{\epsilon}{D} = 2,13 \cdot 10^{-3}$, entonces f : 0,0235 (Ver figura 49) con los factores

de los dos tramos calculados se puede aplicar la ecuación, donde se calculan las pérdidas por fricción por tramo de tuberías con la ecuación 38:

$$Hf = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

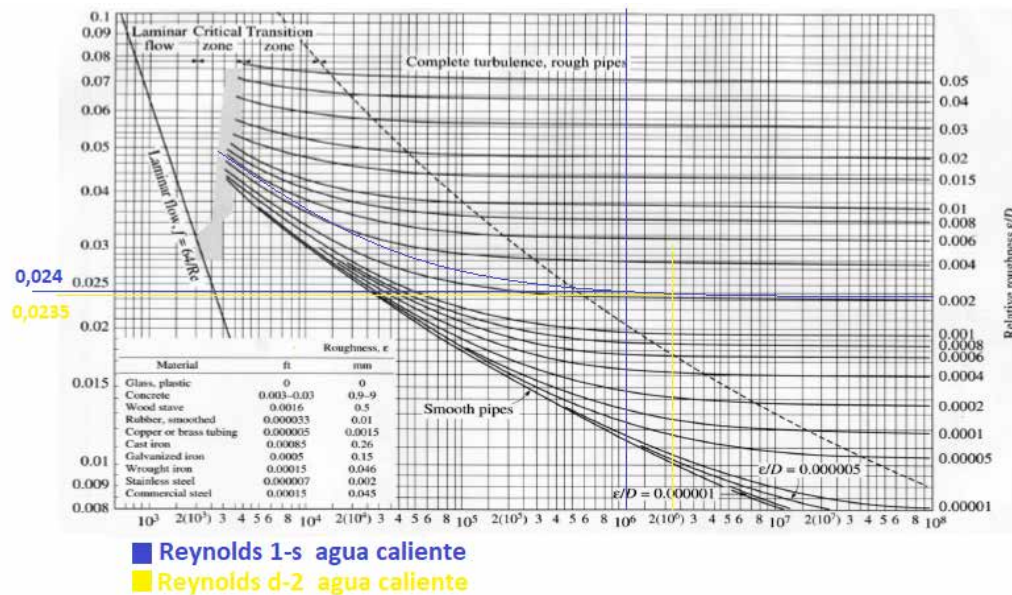


Figura 49. Diagrama de Moody con los cálculos de los factores de fricción de Darcy caliente.

Para el tramo 1-s se calculan las pérdidas primarias con la ecuación 38:

$$Hf_{1-s} = 0,024 \left(\frac{11,49m}{0,07035m} \right) \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,304m. c. a$$

Para el tramo d-2 se calculan las pérdidas primarias con la ecuación 38:

$$Hf_{d-2} = 0,0235 \left(\frac{31,385m}{0,07035m} \right) \frac{(1,14m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,694m. c. a$$

A su vez esto se le debe sumar las pérdidas por accesorios, para el cálculo de las pérdidas de accesorios por tramos se usa la ecuación 40:

$$Hm = Ka \frac{V^2}{2g}$$

Para el tramo 1-s, se tiene una entrada de fluido, tres codos cortos de 90 y una válvula de retención con la tabla de los k de las tuberías (Ver figura 42):

$$Hm_{1-s} = (2,75 + 3(0,9) + (2) + (2,5)) \frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,659m. c. a$$

Para el tramo d-2 se tiene cuatro codos cortos, cuatro válvulas de empalme, dos válvulas de pie, una entrada o salida extendida y una válvula de retención con esto se buscan los k por cada accesorio (Ver figura 45) y se procede a calcular:

$$Hm_{d-2} = [4(0,90) + 4(0,40) + 2(1,75) + (1) + (2,5)] \frac{\left(\frac{1,14m}{s}\right)^2}{2\left(\frac{9,81m}{s^2}\right)} = 0,808 m. c. a$$

Sumando las pérdidas totales por tramo se calculan con la ecuación:

$$h = h + h$$

Para el tramo 1-s se calculan las pérdidas totales con la ecuación 41:

$$l_{1-s} = Hf_{1-s} + Hm_{1-s} = 0,304m. c. a + 0,659m. c. a = 0,963 m. c. a$$

Para el tramo d-2 se calculan las pérdidas totales con la ecuación 41:

$$l_{d-2} = Hf_{d-2} + Hm_{d-2} = 0,689 m. c. a + 0,808m. c. a = 1,497 m. c. a$$

Con las perdidas por tramo se calculan los Hsuc y Hd con las ecuaciones 42 y 43:

$$H_{suc} = H_1 \quad L \text{ de succion}$$

$$H_{suc} = H_1 \quad L \text{ de succion} = 12,198m. c. a \quad 0,963m. c. a = 11,235m. c. a$$

$$H_d = H_2 + \quad L \text{ de descarga}$$

$$H_d = H_2 + \quad L \text{ de descarga} = 15,921 m. c. a. + 1,497m. c. a = 17,418 m. c. a$$

Con esto calculado pasamos a calcular la altura de la bomba con la ecuación 44:

$$H_b = H_d \quad H_{suc}$$

$$H_b = 17,418m. c. a \quad 11,235 m. c. a = 6,2 m. c. a.$$

Con la altura de la bomba y el caudal se puede proceder a seleccionar una bomba adecuada con una familia de curvas, en este caso se seleccionó con las bombas de la KSB, entre la familia de curvas del catálogo se seleccionó la KSB 32-160 a 1750 rpm, porque se adapta más a nuestro punto de trabajo (15,9m³/h y 6,2 m.c.a). En la curva KSB 32-160 (Ver figura 50) se ubica nuestro punto de trabajo:

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamaño Size Tamaño	32-125	
Oferta n° Project - No. Oferta - n°	Item n° Item - No. Pos - n°	Velocidad Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	

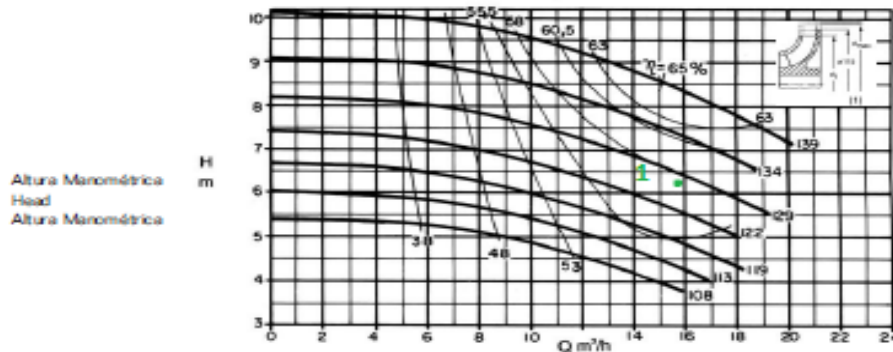


Figura 50. Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm calculo punto 1 agua caliente.

Con esto se procede a calcular la parábola de isoeficiencia para calcular un punto de la curva donde la eficiencia sea la misma que nuestro punto 1, usando la ecuación 53:

$$K_{hq} = \frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{6,2 \text{ m.c.a.}}{(15,9 \text{ m}^3/\text{h})^2} = 0,0309$$

$$H_2 = 0,0245 Q_2^2$$


Asignándole valores a Q para obtener valores de h, (Ver tabla 4) a continuación tabla 4 Q vs H parábola de isoeficiencia:

Tabla 4. Recolección de datos

Q (m ³ /h)	14	16	18
H m.c.a.	4,8	6,3	7,9

Datos calculados.

Con esto calculado se procede a trazar la parábola de isoeficiencia en la curva para encontrar el punto antes mencionado en la intercepción entre la parábola de isoeficiencia y la curva a 139mm de diámetro y eficiencia constante que se llamara punto 2 (**Ver figura 51**).

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamaño Size Tamaño	32-125	
Oferta n° Project - No. Oferta - n°	Item n° Item - No. Pos - n°	Velocidad Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	

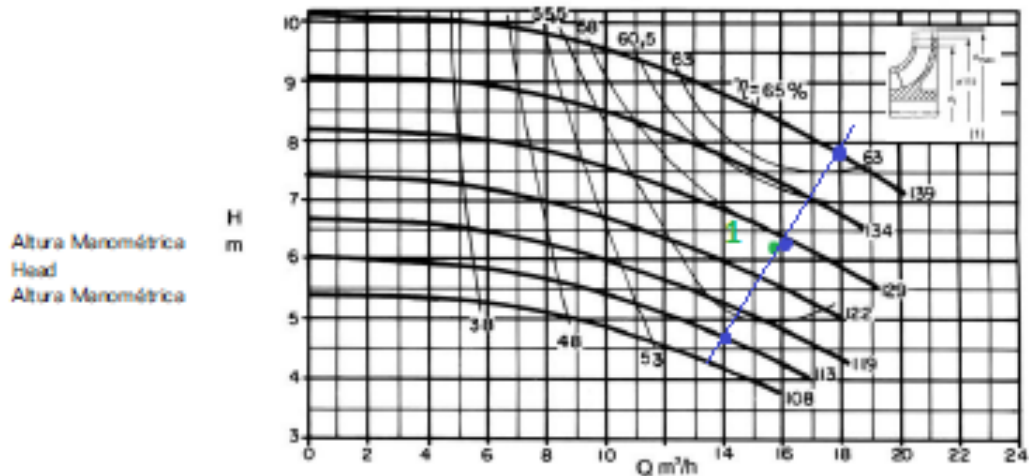


Figura 51 Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm parábola de isoeficiencia agua caliente.

Con el punto 2 (17,8 m³/h y 7,8 m.c.a), se procede a calcular con las reglas de semejanza el diámetro del punto 1 para posterior calcular el porcentaje de recorte, la ecuación permite el cálculo del diámetro con la ecuación 49:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

Se despeja el diámetro 1 y se toma que las velocidades de rotación son las mismas:

$$D_1 = D_2 \sqrt[3]{\frac{Q_1}{Q_2}} = 139mm \sqrt[3]{\frac{15,9m^3/h}{17,8 m^3/h}} = 133,867mm$$

Ahora se calcula con la altura con la ecuación 50:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

$$D_1 = D_2 \sqrt[2]{\frac{H_1}{H_2}} = 139mm \sqrt[2]{\frac{6,2m}{7,8m}} = 123,926mm$$

Ahora se calcula el porcentaje de recorte al que se debe someter el rodete para poder trabajar con el punto de trabajo, se usara para este cálculo el diámetro menor que en este caso es el de 123,926mm ya que si con este diámetro el porcentaje de recorte da menor a 10% el otro también lo hará, con la ecuación 52_

$$\%deRecorte = \frac{D_2 - D_1}{D_2} 100\% = \frac{139mm - 123,926mm}{139mm} 100\% = 10,845\%$$

El 10,845% es mayor que 10% entonces no se puede reducir el tamaño del rodete, pero se puede probar con el diámetro de 133,867mm, ya que con este el porcentaje no pasara del 10%:

$$\%deRecorte = \frac{D_2 - D_1}{D_2} 100\% = \frac{139mm - 133,867mm}{139mm} 100\% = 3,693\%$$

Este tiene un porcentaje de recorte más que aceptable. La potencia de la bomba se calcula con la ecuación 51, pero primero se debe usar el punto de trabajo 2 para estimar un punto en la curva de la potencia, la potencia del punto2 ,0,81 hp (Ver figura 52):

$$\frac{P_{ot2}}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$$

$$P_{ot1} = P_{ot2} \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 = 0, \quad p \left(\frac{133,867mm}{139mm}\right)^5 = 0, \quad p$$

Al igual que la potencia el NPSH se puede calcular con la ecuación 54 y buscando en la figura 49 el valor del $NPSH_2$: 2,6 m:

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

$$NPSH_1 = NPSH_2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = 2,6m \left(\frac{133,867mm}{139mm}\right)^2 = 2,412m$$

Bomba Tipo KSB MEGANORM KSB MEGACHEM Tipo de Bomba	Tem ancho Size Tem ancho	32-125	KSB
Oferta - nº Project - No. Oferta - nº	Item - nº Item - No. Pos - nº		Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal
			1750 rpm

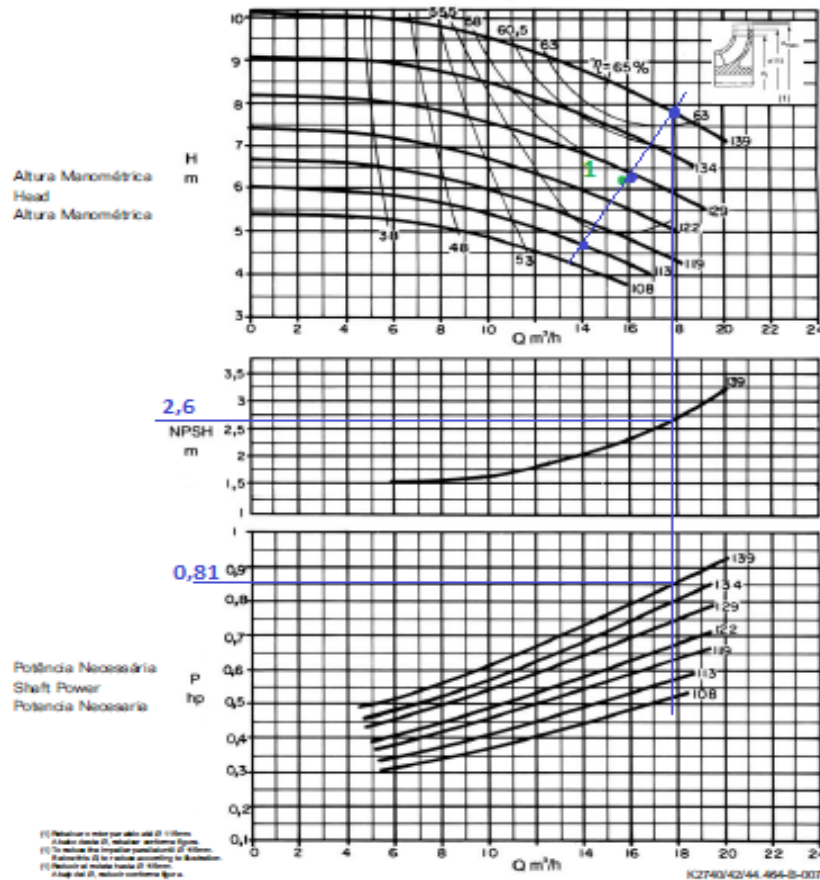


Figura 52. Curva de manual KSB, 32-125 a 1750rpm potencia agua caliente.

Con todo calculado se puede estimar que el diámetro de 133,867mm, una potencia de 0,671hp, un caudal de 15,9 m³/h, altura de la bomba

Con los cálculos de las dos bombas seleccionando dos KSB 32.125 a 1750rpm, se puede mejorar la eficiencia de enfriamiento y de calentamiento del agua a su vez que se solventa el problema de no tener una bomba en la línea de agua fría, este aumento de eficiencia puede verse evidenciado en apartados anteriores donde se

calculó la eficiencia de una torre de enfriamiento de manera ideal y posterior de manera real.

4.3 Redacción de mejoras a implementar y prácticas de laboratorio

4.3.1 Prácticas de Laboratorio

La torre de enfriamiento además de ser usada para producir agua fría para los procesos del laboratorio de Termofluidos, puede ser usada en prácticas de laboratorio donde los alumnos vean directamente el proceso. Las prácticas de laboratorio siempre han sido muy útiles para aprender los fenómenos físicos de manera más sencilla, directa y muy práctica, por su parte las torres de enfriamiento se presentan una variedad de fenómenos que pueden ser estudiados en forma de prácticas de laboratorio.

Estas prácticas pueden ser aplicadas, gracias a la variedad anterior mencionada, en varias materias del Pensum de Ingeniería Mecánica entre las cuales se tiene: Termodinámica I y II, Transferencia de calor y Conversiones de Energía I. A su vez en el Pensum de Ingeniería Industrial se encuentra solo una la cual es: Termodinámica aplicada.

Equipos y materiales necesarios:

Además de las torres de enfriamiento se necesitan una serie de materiales y equipos para realizar las prácticas de laboratorio algunos de estos deben instalarse antes de poder realizarse las prácticas, los equipos y materiales son:

Torre de Enfriamiento de Tiro Forzado.

Ventilador con motor eléctrico.

Transformador de 220 v/12v cc/ca.

Termistores, uno para T_{bh} y otra para T_{bs} . Para el aire.

Termistores para temperatura de agua caliente y agua fría.

Un diagrama Psicrométrico.

Una línea de agua caliente (incluye generación y ductos de agua caliente a enfriar)

Tanque de condensado.

Preparación Experimental:

Se debe seguir una serie de pasos para realizar el experimento de la manera correcta, a continuación, se enumeran:

Preparar la generación de agua caliente a enfriar para esto hacer uso de una fuente de calor de generación de agua caliente a través de la caldera pirotubular del Laboratorio de Termofluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Preparar correctamente el equipo, verificando que la torre de enfriamiento, ductos, rociadores y eliminadores de acarreo se encuentren en buen estado.

Verificar las aspas del ventilador verificar que no esté obstruido para luego revisar su funcionamiento, encendiéndolo, dejar operando unos 3 minutos antes del ingreso de agua caliente.

Ingresar agua caliente a través de los rociadores, dejando que el proceso de adición de vapor al aire húmedo tenga un régimen permanente, por lo menos unos 5 minutos.

Como observaremos el aire es absorbido (inducido) por el ventilador hacia arriba, parte del agua se va con el aire húmedo. (Ver figura 53).

Según el diagrama (Ver figura 53) el balance de masas es el siguiente con la ecuación 8:

$$Mw1 + (Ma X1) = Mw2 + (Ma X2)$$

Y el balance de energía con la ecuación 9:

$$(Mw1 \quad w1) + (Ma \quad) = (Mw2 \quad w2) + (Ma \quad)$$

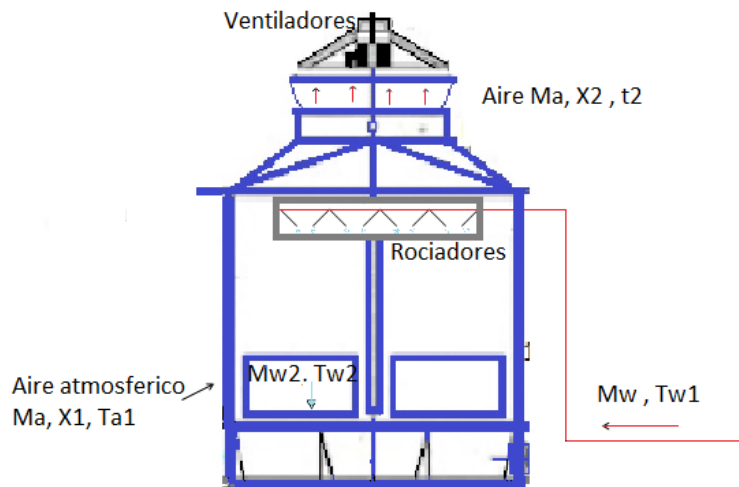


Figura 53. Diagrama de funcionamiento de torre de enfriamiento.

Despejando la masa de agua 2:

$$Mw2 = Mw1 + (Ma X1) - (Ma X2)$$

$$Mw2 = Mw1 + Ma (X1 - X2)$$

Reemplazando (Ec. 13) en la ecuación de Balance de Energía para el volumen de Control:

$$(Mw1 w1) + (Ma X1) = (Ma X2) + [Mw1 + Ma (X1 - X2)] w2$$

Reduciendo convenientemente:

$$Ma = [Mw1 (w2 - w1)] / [(X1 - X2) - w2]$$

Siendo los valores anteriormente leídos:

Mw1 = Masa de agua entrante.

tw1 = Temperatura de ingreso del agua a la Torre.

tw2 = Temperatura de salida del agua de la Torre.

Ta1BS = Temperatura de ingreso del aire (Bulbo seco).

Ta1BH = Temperatura de ingreso del aire (Bulbo húmedo).

Ta2BS = Temperatura de salida del aire (Bulbo seco).

Ta2BH = Temperatura de salida del aire (Bulbo húmedo).

P= presión atmosférica =101 KPa.

x_1 = Humedad relativa de ingreso del aire.

x_2 = Humedad relativa de salida del aire.

Para lo cual deberá tomar la lectura promedio de 3 valores para obtener un valor característico, los valores deberán ser presentados en la Tabla N° 5

A continuación, Tabla 5 recolección de datos para la realización de prácticas de laboratorio:

Tabla 5. Recolección de datos

Parámetro	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio
Mw1				
Tw1				
Tw2				
Ta1 BS				
Ta1BH				
Ta2BS				
Ta2BH				

Datos recopilados.

Cuestionario a realizar:

Para lograr comprender y analizar los datos recopilados se debe hacer un post-laboratorio donde se usen los datos recopilados para hacer cálculos pertinentes y poder llegar a conclusiones además de que se puedan reforzar lo previamente estudiado. Para realizar el cuestionario se debe realizar los siguientes pasos:

Se deberá realizar la Practica tomando tres temperaturas distintas de temperatura de ingreso de agua, para lo cual los grupos deberán realizar la toma de datos correctos previa coordinación con el Profesor de Practica., se pueden trabajar con temperaturas de ingreso de agua de 39°C, 42°C y 45°C. Luego cada grupo deberá tener por lo menos un conjunto de tres grupos de medidas para poder realizar la traficación del comportamiento de la torre de enfriamiento del Laboratorio de Termofluidos.

Determinar los valores de X_1 y X_2 humedades absolutas en función a P_s (Presiones de saturación en los estados 1 y 2) o también haciendo uso de la carta psicrométrica

Hallar los valores teóricos de: h_{w2} , h_{w1} , h_1 , h_2 .

Calcular el valor de la masa de aire aplicando la formula M_a .

Determinar teóricamente el flujo de aire seco

Determinar teóricamente el valor de la masa de agua que se evapora.

Describir que es un proceso de deshumidificación y humidificación. Detallarlo haciendo uso de la carta psicrométrica.

Describir las características, diferencias y aplicaciones industriales de las Torres de Enfriamiento de Tiro forzado y Tiro inducido.

Graficar:

Masa de agua caliente vs Temperatura (inicial y final del agua).

Masa de aire vs Temperatura (inicial y final del agua).

Masa de agua evaporada vs Temperatura (inicial y final del agua).

Masa de agua caliente vs T_{bs} - T_{bh} .

Masa de aire vs T_{bs} - T_{bh} .

Masa de agua evaporada vs T_{bs} - T_{bh} .

Masa de agua caliente vs Humedad Relativa 1, Humedad Relativa 2.

Masa de aire vs Humedad Relativa 1, Humedad Relativa 2.

Masa de agua evaporada vs Humedad Relativa 1, Humedad Relativa 2.

Interpretar racionalmente los gráficos.

4.3.2 Elaboración del plan de mantenimiento preventivo y correctivo

4.3.3 Estado del mantenimiento preventivo en el sistema de la torre de enfriamiento

Al establecer la instalación de la torre en 2006 no se realizó ningún tipo de plan de mantenimiento ni correctivo ni preventivo, ningún tipo de inventario o fallas comunes de los equipos que componen la torre, tampoco se encontró registro de otro

mantenimiento hecho, por otro lado, la empresa Rodelca se ofreció para hacerle mantenimiento a la misma hace algunos años, pero esto no se hizo y se denota en el estado actual de la misma ya que operacionalmente la torre tiene ciertas deficiencias y el estado de su recinto y adyacencias se aprecia el abandono que en ella reside desde hace unos años.

De hecho, no se llevaba un registro del comportamiento del sistema se enfriamiento del agua de condensación. En vista de esto la necesidad de iniciar y planificar un mantenimiento preventivo era alta, entonces partiendo de la información más básica (catálogos), hasta llegar a una programación que pudiera ser utilizada por la Universidad y mejorada en el transcurso del tiempo, ya que el mantenimiento es un proceso continuo y debe siempre estar en continua retroalimentación.

Para empezar, se debe realizar un mantenimiento correctivo dado el estado actual de la torre de enfriamiento donde le limpien todas sus partes siguiendo los lineamientos que se expondrán a continuación

4.3.4 Recolección de la información necesaria para el mantenimiento

Cuando se tiene un sistema industrial en una empresa y este acaba de ser instalado y se ha empezado a operar en condiciones normales y se usa con frecuencia, al ser importante para la producción y operación de la planta en este se debe planificar labores de mantenimiento preventivo para garantizar su funcionamiento óptimo y por ende el cumplimiento de las operaciones, y además de la predicción y/o prevención de las fallas. Al iniciar el plan de mantenimiento se partió de una condición similar, debido a que no había disponibilidad de planes de mantenimientos pasados aplicados, corregidos o registros de los mismos, solo existía el trabajo de manuales de instalación. Con esta información más la encontrada en Internet se organizaron las labores de mantenimiento por componente para su fácil operación. Gracias a esto se extrajeron cada una de las labores de mantenimiento recomendadas por periodos.

4.3.5 Inventario de componentes de la torre de enfriamiento

A continuación, se presenta parte de la información recolectada al momento de hacer el inventario de la torre de enfriamiento, en él se observan algunos datos de

operación de los componentes de la torre suministrados por la empresa Rodelca. A continuación, Tabla 6 Descripción de los eliminadores de arrastre:

Tabla 6.

Componente: Eliminadores de arrastre	
Aplicación: Contra flujo y flujo cruzado	
Desarrollados y suministrados por: Rodelca	
Suministrado por: Rodelca	
Materiales: PVC	
Rango de velocidades: de 2 a 5 m/s	
Retención: 99,7 %	Instalados en 2007

Datos recopilados.

A continuación, Tabla 7. Descripción de Relleno de contacto SG:

Tabla 7

Componente: Relleno de contacto SG
Aplicación: Aguas problemáticas
Desarrollado y suministrado por: Rodelca
Materiales: Polipropileno
Temperaturas de fluidos: de hasta 70 C
Tiempo de operación: >200.000m
Instalado en 2007

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 8.** Descripción del Tanque colector:

Tabla 8

Componente: Tanque colector
Aplicación: Contiene las conexiones de succión, drenaje y sobre flujo y criba para evitar cavitación.
Desarrollado y suministrado por: Rodelca
Materiales: poliéster reforzado con fibra de vidrio
Volumen del tanque: 500 Lts
Instalada en 2007

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 9.** Descripción de la Carcasa:

Tabla 9.

Componente: Carcasa
Aplicación: Auto-Portante con gran resistencia a la acción corrosiva del medio ambiente y condiciones del aire y agua que maneja.
Desarrollado y suministrado por: Rodelca
Materiales: poliéster reforzado con fibra de vidrio
Mantiene unido y les da soporte a los otros componentes
Instalada en 2007

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 10.** Descripción del Ventilador Axial:

Tabla 10.

Componente: Ventilador
Aplicación: Del tipo Axial
Desarrollado y suministrado por: Rodelca
Materiales: Hecho todo de plástico
Potencia del ventilador: 3HP
Conexión del ventilador: 220/440 V-3fases.
Velocidad del ventilador: 1150 rpm
Instalada en 2007

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 11.** Descripción de la Torre de enfriamiento:

Tabla 11.

Componente: Torre de enfriamiento
Aplicación: Enfriar el agua proveniente del circuito de la caldera
Desarrollado y suministrado por: Rodelca
Materiales: PVC, fibra de vidrio y poliéster reforzado con fibra de vidrio
Caudal: 15,9 m ³ /h
Temperatura de agua caliente: 40,8 C
Temperatura de agua fría: 29,7 C
Temperatura de bulbo húmedo: 25,6 C
Instalada en 2007

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 12.** Descripción de la Bomba de agua:

Tabla 12. Bombas de agua

Componente: Bombas de agua
Aplicación: Impulsar el agua hacia la torre y fuera de ella.
Desarrollado y suministrado por: Pedrollo.
Materiales: Cuerpo de la bomba de Hierro fundido.
Conexiones: 220/440 V.
Caudal: 15,9 m ³ /h
Frecuencia: 60 Hz.
Tubería de entrada y salida: 1"
Instalada en 2007

Datos recopilados.

4.3.6 Establecimiento de programa del mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es de vital importancia en cualquier equipo, ya que a pesar de ser la forma más básica de mantenimiento es la que consigue y corrige las averías cuando estas no se pueden prevenir, por esto se debe trazar un plan de mantenimiento correctivo donde se describan las tareas a realizarse:

De lo anteriormente mencionado, podemos resumir que los principales objetivos del mantenimiento correctivo son:

- Lograr la máxima disponibilidad de la infraestructura instalada.
- Preservar la calidad del servicio y el valor de esta infraestructura evitando el deterioro prematuro.
- Conseguir lo anterior mediante la alternativa más económica posible.
- Minimizar los costos de mantenimiento.
- Minimizar los períodos de mantenimiento.

Debido a que se espera que falle con mucha frecuencia se tomara como política de mantenimiento la de equipos no sustituibles, si llegara a fallar se tomara nota de esta falla y se consultara con la Tabla 1, y se tomara la acción prudente a la reparación de la falla. Dicho registro se hará en la siguiente tabla, tabla 13 de registro de falla de mantenimiento correctivo:

Tabla 13.

Programa de registro de mantenimiento correctivo de la torre de enfriamiento				
Realizado por:		Fecha:	Hora:	
Componentes	Estado	Acción realizada	Resultado	Observaciones
1-				
2-				
3-				
4-				
5-				
6-				

Datos recopilados.

4.3.7 Establecimiento de programación del mantenimiento preventivo

Una vez que se organizaron los componentes y equipos, y la programación del mantenimiento correctivo, se procedió a realizar y definir las tareas de mantenimiento preventivo este es el destinado a la conservación de equipos o instalaciones mediante la realización de revisión y reparación que garanticen su buen funcionamiento y debe ir de la mano con las tareas de mantenimiento correctivo, en este se deben realizar chequeos rutinarios de diferentes equipos para garantizar y prevenir el uso prolongado y excesivo del mantenimiento correctivo ya que este suele con llevar un gasto económico mayor.

Con los datos previamente descriptos se puede determinar las labores de mantenimiento por equipo, y después se puede hacer la programación grafica del mantenimiento para cada uno de los componentes de la torre, lo mismo aplica para el mantenimiento de las bombas de condensación. A continuación, Tabla 14. Leyenda del mantenimiento:

Tabla 14.

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 15.** Programa de mantenimiento:

Tabla 15.

TORRE DE ENFRIAMIENTO	Ventilador y protector	Motor eléctrico	Eje de transmisión	Caja reductora	Eliminadores	Rellenos	Tanque de agua	Sistema rociador	Válvula flotante	Filtros de succión	Válvulas de control	Miembros estructurales	Cilindro del ventilador
Programa de inspección y mantenimiento													
1-Inspección por obstrucción					M			M		M			
2-Chequeo por ruido y vibraciones anormales	D	D	D	D									
3-Inspección de set de tornillos y chaveteros	SM	SM	SM	SM									
4-Asegurar que los venteos de las cajas reductoras estén abiertos				SM									
5-Lubricar		R											
6-Chequeo de los sellos y aceite en la caja reductora				M									
7-Chequeo del nivel de operación del aceite en la caja reductora				D									
8-Chequeo del nivel de aceite estático en la caja reductora				S									
9-Chequeo por condensación o ensuciamiento				M									
10-Cambio de aceite en la caja reductora				SM									

Continuación, Tabla 15 Programa de mantenimiento

TORRE DE ENFRIAMIENTO	Ventilador y protector	Motor eléctrico	Eje de transmisión	Caja reductora	Eliminadores	Rellenos	Tanque de agua	Sistema rociador	Válvula flotante	Filtros de succión	Válvulas de control	Miembros estructurales	Cilindro del ventilador
Programa de inspección y mantenimiento													
11-Chequeo de las tolerancias de inclinación de las aspas del ventilador	SM												
12-Chequeo del nivel de agua							D	D					
13-Chequeo de fugas o filtraciones				S			SM	SM	SM				
14-Inspección de condiciones generales	SM	SM	SM	SM	A	SM	A	SM	A	SM	SM	SM	SM
15-Ajustar pernos	SM	SM	SM	SM									SM
16-Limpiar	R	R	R	R	R	R	SM	R	R	R	R		
17-Pintar	R	R	R	R									
18-Rebalancear	R		R										
19-Abrir y cerrar completamente las válvulas de control											SM		
20-Inspeccionar y reparar por uso Seguro	A		A										
21-Verificar la calidad del agua							S						

Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 16.** Programa de mantenimiento de bombas:

Tabla 16.

BOMBAS DE AGUA PROGRAMA DE INSPECCIÓN						
	DIARIA	MENSUAL	TRIMESTRAL	SEMESTRAL	ANUAL	CUANDO REQUIERA
1- Revisión de los	X					
2- Verificar los	X					
3- Verificar al tacto	X					
4- Chequeo de ruido	X					
5- Limpieza del eje		X				
6- Limpiar las		X				
7- Lubricar bombas		X				
8- Chequear los		X				
9- Limpieza de los		X				
10- Revisión de la			X			
11- Limpieza				X		
12- Probar la					X	
13- Cambio de los						X
14- Cambio de						X
15- Revisión					X	
16- Revisión de				X		
17- Alineación del			X			
18- Chequeo del					X	
19- Limpieza y					X	

Nota: Datos recopilados.

4.3.8 Programación de labores de mantenimiento

Con los esquemas principales de mantenimiento se procedió a desglosar las labores de mantenimiento a realizar, agrupándolas en periodos y especificando las actividades a realizar en cada labor.

La programación quedó especificada de la siguiente forma:

Programación diaria, a continuación, Tabla 16. Programación diaria de mantenimiento:

Tabla 17. Programación diaria de mantenimiento.

TORRE DE ENFRIAMIENTO	Descripción	Antes de encender	Después de encender	REFERENCIA
Programa de inspección y mantenimiento (DIARIO)				
Ventilador y protector	D			Tabla 18
Motor eléctrico	D			Tabla 19
Eje de transmisión	D			Tabla 20
Caja reductora	D			Tabla 21
Sistema rociador	D			Tabla 22

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 18. Programación diaria de mantenimiento del ventilador:

Tabla 18. Programación diaria de mantenimiento del ventilador.

Ventilador y protector	Descripción	Antes de encender	Después de encender
2-Chequeo e inspección por ruido y vibraciones anormales	D	X	

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 19.** Programación diaria de mantenimiento del motor eléctrico:

Tabla 19. Programación diaria de mantenimiento del motor eléctrico.

Motor eléctrico	Descripción	Antes de encender	Después de encender
2-Chequeo e inspección por ruido y vibraciones anormales	D	X	

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 20.** Programación diaria de mantenimiento del eje de transmisión:

Tabla 20. Programación diaria de mantenimiento del eje de transmisión.

Eje de transmisión	Descripción	Antes de encender	Después de encender
2-Chequeo e inspección por ruido y vibraciones anormales	D	X	

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 21.** Programación diaria de mantenimiento de la caja reductora:

Tabla 21. Programación diaria de mantenimiento de la caja reductora.

Caja reductora	Descripción	Antes de encender	Después de encender
2-Chequeo e inspección por ruido y vibraciones anormales.	D	X	
7-Chequeo del nivel de operación del aceite en la caja reductora.	D	X	

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 22.** Programación diaria de mantenimiento del sistema rociador:

Tabla 22. Programación diaria de mantenimiento del sistema rociador.

Sistema rociador	Descripción	Antes de encender	Después de encender
12-Chequeo del nivel de agua	D		X

Nota: Datos recopilados.

Programación semanal, a continuación, **Tabla 23.** Programación semanal de mantenimiento:

Tabla 23. Programación semanal de mantenimiento.

TORRE DE ENFRIAMIENTO Programa de inspección y manteamiento (SEMANAL)	Descripción	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Referencia
		Caja reductora	S						
Tanque de agua	S								Tabla 25

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 24.** Programación semanal de mantenimiento caja reductora:

Tabla 24. Programación semanal de mantenimiento caja reductora.

Caja reductora	Descripción	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
8- Chequeo aceite de nivel de aceite estático en la caja reductora	S	X						
13- Chequeo de fugas o filtraciones	S	X						

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 25.** Programación semanal de mantenimiento tanque de agua:

Tabla 25. Programación semanal de mantenimiento tanque de agua.

Tanque de agua	Descripción	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
21-Verificar la calidad del agua.	S		X					

Nota: Datos recopilados.

Programación mensual, a continuación, **Tabla 26.** Programación mensual de mantenimiento:

Tabla 26. Programación Mensual de mantenimiento.

	Descripción	Semana	Semana	Semana	Semana	Referencia
--	-------------	--------	--------	--------	--------	------------

TORRE DE ENFRIAMIENTO Programa de inspección y mantenimiento (MENSUAL)						
Caja reductora	M					Tabla 27
Eliminadores	M					Tabla 28
Sistema rociador	M					Tabla 29
Filtros de succión	M					Tabla 30
Bomba de condensación	M					Tabla 31

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 27.** Programación mensual de mantenimiento caja reductora:

Tabla 27. Programación Mensual de mantenimiento caja reductora.

Caja reductora	Descripción	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
8- Chequeo de los sellos y aceite en la caja reductora	M	X			
13- Chequeo por condensación o ensuciamiento	M	X			

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 28.** Programación mensual de mantenimiento eliminador:

Tabla 28. Programación Mensual de mantenimiento eliminador.

Eliminadores	Descripción	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
1- Inspección por obstrucción	M		X		

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 29. Programación mensual de mantenimiento sistema rociador:

Tabla 29. Programación Mensual de mantenimiento sistema rociador.

Sistema rociador	Descripción	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
1- Inspección por obstrucción	M		X		

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 30. Programación mensual de mantenimiento filtros de succión:

Tabla 30. Programación Mensual de mantenimiento filtros de succión.

Filtros de succión	Descripción	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
1- Inspección por obstrucción	M			X	

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 31. Programación mensual de mantenimiento bombas:

Tabla 31. Programación Mensual de mantenimiento bombas.

Bombas	Descripción	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
5-Limpieza del eje, acople y sistema de verificación de los acoples.	M			X	
6- Limpiar las ventanas de las ventosas	M			X	
7. Lubricar bombas (a través del tapón de alivio)	M			X	
9-Limpieza de los contactores	M			X	

Nota: Datos recopilados.

Programación semestral A continuación, **Tabla 32.** Programación semestral de mantenimiento:

Tabla 32. Programación Semestral de mantenimiento.

TORRE DE ENFRIAMIENTO Programa de inspección y mantenimiento (SEMESTRAL)	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Referencia
Ventilador y protector	SM													Tabla 33
Motor eléctrico	SM													Tabla 34
Eje de transmisión	SM													Tabla 35
Caja reductora	SM													Tabla 36
Cilindro del ventilador	SM													Tabla 37
Relleno de contacto SG	SM													Tabla 38
Sistema rociador	SM													Tabla 39
Carcaza	SM													Tabla 40
Tanque de agua	SM													Tabla 41
Válvula flotante	SM													Tabla 42
Filtros de succión	SM													Tabla 43
Válvulas de control	SM													Tabla 44
Bomba	SM													Tabla 45

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 33.** Programación mensual de mantenimiento sistema rociador:

Tabla 33. Programación mensual de mantenimiento sistema rociador.

Ventilador y protector	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
3- Inspección de set de tornillos y chaveteros	SM	X						X					
11- Chequeo de las tolerancias de inclinación de las aspas del ventilador	SM	X						X					
14- Inspección de condiciones generales del ventilador	SM	X						X					
15- Ajustar pernos	SM	X						X					

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 34. Programación semestral de mantenimiento motor eléctrico:

Tabla 34. Programación Semestral de mantenimiento motor eléctrico.

Motor eléctrico	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
3- Inspección de set de tornillos y chaveteros	SM	X						X					
14- Inspección de condiciones generales del motor eléctrico	SM	X						X					
15- Ajustar pernos	SM	X						X					

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 35. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 35. Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión.

Eje de transmisión	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
3- Inspección de set de tornillos y chaveteros	SM	X						X					
14- Inspección de condiciones generales del ventilador	SM	X						X					
15- Ajustar pernos	SM	X						X					

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 36. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 36. Programación Semestral de mantenimiento caja reductora.

Caja reductora	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales de la caja reductora	SM	X						X					
15- Ajustar pernos	SM	X						X					
3- Inspección de set de tornillos y chaveteros	SM	X						X					
4- Asegurar que los venteos de las cajas reductoras estén abiertos	SM	X						X					
10- Cambio de aceite en la caja reductora	SM	X						X					

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 37. Programación semestral de mantenimiento cilindro del ventilador:

Tabla 37. Programación Semestral de mantenimiento cilindro del ventilador.

Cilindro del ventilador	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales del cilindro del ventilador	SM	X						X					
15- Ajustar pernos	SM	X						X					

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 38. Programación semestral de mantenimiento relleno:

Tabla 38. Programación Semestral de mantenimiento relleno.

Rellenos	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales del relleno	SM		X						X				

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 39. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión.

Tabla 39. Programación Semestral de mantenimiento sistema rociador.

Sistema rociador	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
13-Chequeo de fugas o filtraciones	SM		X						X				
14- Inspección de condiciones generales del relleno	SM		X						X				

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 40. Programación semestral de mantenimiento carcaza:

Tabla 40. Programación Semestral de mantenimiento carcaza.

Carcaza	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales de la carcaza	SM		X						X				

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 41. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 41. Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión.

Tanque de agua	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
13- Chequeo de fugas o filtraciones	SM			X						X			
16- Limpiar	SM			X						X			

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 42. Programación semestral de mantenimiento válvula flotante:

Tabla 42. Programación Semestral de mantenimiento válvula flotante.

Válvula flotante	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
13- Chequeo de fugas o filtraciones	SM			X						X			

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 43. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 43. Programación Semestral de mantenimiento válvula flotante.

Filtros de succión	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales de los filtros de succión	SM			X						X			

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 44. Programación semestral de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 44. Programación Semestral de mantenimiento eje de transmisión.

Válvula de control	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales de las válvulas de control	SM			X						X			
19- Abrir y cerrar completamente las válvulas de control	SM			X						X			

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 45. Programación semestral de mantenimiento válvula de control:

Tabla 45. Programación Semestral de mantenimiento válvula de control.

Bomba	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1- Limpieza general de las válvulas y filtros de las tuberías.	SM					X						X	
6- Revisión de cables, conexiones, relés, contactores.	SM					X						X	

Nota: Datos recopilados

Programación anual de mantenimiento: en esta se muestran las tareas de mantenimiento programadas en todo el año de manera general y por los diferentes equipos, que componen la torre de enfriamiento, a continuación, Tabla 46.

Programación anual de mantenimiento:

Tabla 46. Programación anual de mantenimiento.

TORRE DE ENFRIAMIENTO	Programa de inspección y mantenimiento (ANUAL)	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Referencia
Ventilador y protector	A														Tabla 47
Eje de transmisión	A														Tabla 48
Eliminadores	A														Tabla 49
Tanque de agua	A														Tabla 50
Válvula flotante	A														Tabla 51

Nota: Datos recopilados

A continuación, Tabla 47. Programación anual de mantenimiento ventilador y protector:

Tabla 47. Programación anual de mantenimiento ventilador y protector.

Ventilador y protector	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
20- Inspeccionar y reparar por uso seguro	A	X											

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 48. Programación cuando lo requiera de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 48. Programación anual de mantenimiento eje de transmisión.

Eje de transmisión	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
20- Inspeccionar y reparar por uso seguro	A	X											

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 49. Programación cuando lo requiera de mantenimiento eliminadores:

Tabla 49. Programación anual de mantenimiento eliminador.

Eliminadores	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14- Inspección de condiciones generales de los eliminadores	A		X										

Nota: Datos recopilados

A continuación, Tabla 50. Programación cuando lo requiera de mantenimiento tanque de agua:

Tabla 50. Programación anual de mantenimiento tanque de agua.

Tanque de agua	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14-	Inspección de condiciones generales de los eliminadores			X									

Nota: Datos recopilados

A continuación, Tabla 51. Programación cuando lo requiera de mantenimiento válvula flotante:

Tabla 51. Programación anual de mantenimiento válvula flotante.

Válvula flotante	Descripción	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14-	Inspección de condiciones generales de los eliminadores			X									

Nota: Datos recopilados

Programación de mantenimiento cuando se requerido: en este apartado se observará las aplicaciones del mantenimiento correctivo por equipo. Donde se enfocara mas que todo la parte de limpieza. A continuación, Tabla 52. Programación cuando lo requiera de mantenimiento:

Tabla 52. Programación cuando lo requiera de mantenimiento.

TORRE DE ENFRIAMINETO Programa de inspección y mantenimiento (CUANDO LO REQUIERA)	Descripción	Referencia
Ventilador y protector	R	Tabla 53
Motor eléctrico	R	Tabla 54
Eje de transmisión	R	Tabla 55
Caja reductora	R	Tabla 56
Eliminadores	R	Tabla 57
Relleno de contacto SG	R	Tabla 58
Sistema rociador	R	Tabla 59
Válvula flotante	R	Tabla 60
Filtros de succión	R	Tabla 61
Válvulas de control	R	Tabla 62

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 53.** Programación cuando lo requiera de mantenimiento ventilador y protector:

Tabla 53. Programación cuando se requiera de mantenimiento ventilador y protector.

Ventilador y protector	Descripción	Recomendado
16- Limpiar	R	8 meses
17-Pintar	R	Al año
18-Rebalancear	R	8 meses

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 54.** Programación cuando lo requiera de mantenimiento motor eléctrico:

Tabla 54. Programación cuando se requiera de mantenimiento motor eléctrico.

Motor eléctrico	Descripcion	Recomendado
5-Lubricar	R	6 meses
16- Limpiar	R	8 meses
17-Pintar	R	Al año

Nota: Datos recopilados

A continuación, **Tabla 55.** Programación cuando lo requiera de mantenimiento eje de transmisión:

Tabla 55. Programación cuando se requiera de mantenimiento eje de transmisión.

Eje de transmisión	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	8 meses
17-Pintar	R	Al año
18-Rebalancear	R	8 meses

Nota: Datos recopilados

A continuación, **Tabla 56.** Programación cuando lo requiera de mantenimiento caja reductora:

Tabla 56. Programación cuando se requiera de mantenimiento caja reductora.

Caja reductora	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	8 meses
17-Pintar	R	Al año

Nota: Datos recopilados

A continuación, **Tabla 57**. Programación cuando lo requiera de mantenimiento eliminador:

Tabla 57. Programación cuando se requiera de mantenimiento eliminadores.

Eliminadores	Descripción	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 58**. Programación cuando lo requiera de mantenimiento relleno:

Tabla 58. Programación cuando se requiera de mantenimiento relleno.

Relleno	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados.

A continuación, **Tabla 59**. Programación cuando lo requiera de mantenimiento rociadores:

Tabla 59. Programación cuando se requiera de mantenimiento rociadores.

Rociadores	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados.

A continuación, Tabla 60. Programación cuando lo requiera de mantenimiento ventilador y protector:

Tabla 60. Programación cuando se requiera de mantenimiento ventilador y protector.

Válvula flotante	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados

A continuación, Tabla 61. Programación cuando lo requiera de mantenimiento filtros de succión:

Tabla 61. Programación cuando se requiera de mantenimiento filtros de succión.

Filtros de succión	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados

A continuación, Tabla 62. Programación cuando lo requiera de mantenimiento válvulas de control:

Tabla 62. Programación cuando se requiera de mantenimiento válvulas de control.

Válvulas de control	Descripcion	Recomendado
16- Limpiar	R	6 meses

Nota: Datos recopilados.

4.3.9 Aplicación del mantenimiento preventivo y correctivo en Torre de Enfriamiento

Las labores de mantenimiento de la Torre de enfriamiento de todo un año calendario, se hicieron con la finalidad de programar de cero el mantenimiento ya que no se tenía ningún tipo de mantenimiento, se debe aplicar un mantenimiento correctivo total a toda la torre de enfriamiento junto con el plan de acondicionamiento para poderla poner operativa.

A este mantenimiento se le debe agregar el mantenimiento de planta física al recinto de la torre y las inmediaciones del mismo para garantizar el ambiente sea de un uso adecuado para que los estudiantes y profesores puedan hacer uso de la misma con comodidad y tranquilidad por ende se agregan ciertas recomendaciones en el mantenimiento y su frecuencia.

Además de cumplir los tiempos de mantenimiento se debe hacer una correcta aplicación de este para garantiza el uso prolongado de la torre de enfriamiento a continuación, Tabla 63. Programación cuando lo requiera de mantenimiento planta física:

Tabla 63. Programación de mantenimiento planta física.

TORRE DE ENFRIAMINETO Programa de inspección y mantenimiento de planta física	Frecuencia
Limpieza del piso	Semanal
Limpieza de las rejas externas	Mensual
Podado de monte y matas	Mensual

Nota: Datos recopilados

CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo de investigación realizado aplicando todos los procesos metodológicos y cumpliendo paso a paso con los objetivos propuestos, se concluye que:

La torre de enfriamiento de la Universidad Jose Antonio Páez se encuentra en un estado inoperable, tiene deficiencias en sistema, como la falta de la bomba de agua fría y los rellenos y eliminadores de arrastre que han su tiempo de instalación y la bomba de agua caliente que a pesar de que se encuentra en la instalación no impulsa el caudal necesario por el sistema, se necesita la instalación de una bomba para la línea de agua fría y un mantenimiento exhaustivo para ponerla a operar. Con una eficiencia de trabajo de aproximadamente 15%.

La información de la torre de enfriamiento obtenida tanto en los archivos de la universidad, como en la instalación de la torre y en la empresa Rodelca fueron de vital importancia ya que con ellos se pudo detallar sus partes para preparar todo para un posterior análisis y un plan de acondicionamiento que permitirá el aprovechamiento de la misma.

A su vez se analizaron varias opciones para hacer una mejora a la torre de enfriamiento decantándose por la selección de dos nuevas bombas para el circuito, haciendo los cálculos pertinentes se obtuvo un aumento de eficiencia a la eficiencia inicial del proyecto de 73,026% o una temperatura de salida del agua de 29,7 con respecto a la salida con el caudal de 5,4m³/h que es de 38,38 el que se tiene actualmente.

En la UNITEC y en las fuentes digitales se observó varias prácticas de laboratorio, se obtuvo la que se tiene a continuación ya que está estudiaba muchas cosas de las torres de enfriamiento y permitiría a los estudiantes aprender conocimientos sobre la materia observando la operación de la torre.

El Mantenimiento de los componentes y de la torre en general, se hizo gracias a la visita a las instalaciones de Goodyear de Venezuela y a la información suministrada en las fuentes digitales donde se hizo un inventario de componente cosa que no se tenía y una programación de mantenimiento donde se especifica la frecuencia de mantenimiento, esto con la finalidad de mantener el estado que se le quiere llegar con este trabajo a la torre de enfriamiento por eso este mantenimiento debe hacerse de manera rigurosa ya que permitirá asegurar la operación adecuada de la torre y la durabilidad de sus componentes.

RECOMENDACIONES

Sería prudente realizar un trabajo similar al presente en la caldera para que la operación de la misma se pueda realizar junto a la de la torre de enfriamiento, donde se revisen componentes, tuberías y equipos y se diagnostiquen los mismos.

Realizar una revisión más exhaustiva de conexiones de la torre ya que pueden estar dañados los cables y conexiones ya que estos pueden presentar problemas por falta de mantenimiento, por falta de uso y por estar expuestos en la intemperie.

Para asegurar la seguridad integral de los componentes de la torre se debe mejorar el recinto en que ella se guarda colocándole cadenas un candado e iluminación, además de hacer más guardias de vigilancia por esa zona ya que es una zona lejana a las otras instalaciones y puede fácilmente ser víctima de hurto.

Para las tareas de mantenimiento se recomienda seguir la programación y tener alguien apto para realizarlo, algunas de las tareas de mantenimiento más complicadas deben ser previstas y realizadas por alguien cualificado como la empresa Rodelca que prestan este servicio.

Para completar el ciclo Rankine se puede realizar el proyecto de la turbina de vapor.

Una vez instalada la torre y sus mejoras se debe probar su funcionamiento para ver si se observan más fallas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cámara. I (2004), **Intercambiadores de calor**. Extraído de <https://es.scribd.com/document/330642643/Intercambiador-de-Calor>

Chareo, J (2013), **Mantenimiento Preventivo y Correctivo a Torres de Enfriamiento**. Trabajo de Grado Publicado. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.

Elmerida, Y (2008), **Evaluación del Sistema de Enfriamiento del Mejorador PDVSA Petroviar**. Trabajo de Grado Publicado. Universidad de Oriente. Barcelona, Venezuela.

García, J. (2010). **Declaraciones del Director de Epidemiología y Análisis Estratégico del MPPS**. [Documento en línea]. Disponible: www.minci.gob.ve/entrevistas/3/5994 [Consulta: agosto 2010, 11].

engel. Y y Simbala. J (1995), **Mecánica de los fluidos, fundamentos y aplicaciones**. Turquía.

engel, Y. (2007), **Transferencia de calor y más un enfoque práctico**. Turquía.

engel, Y. (2015), **Termodinámica**. Turquía

González (2002) **Intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones**. Venezuela.

Goodyear de Venezuela. (2001). **Manual de Operación y Mantenimiento**. Valencia, Venezuela: Manual de operación y mantenimiento de Rodelca.

Hurtado. (2002), **Metodología de la investigación**. Caracas.

Isidro, A (2006), **Elaboración de un Plan de Mantenimiento y Evaluación del Sistema de la Torre de Enfriamiento del Edificio Sede PDVSA Puerto la Cruz**. Trabajo de Grado Publicado. Universidad de Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

Linares, D. (2001). **Intercambiadores de Calor**. Mérida, Venezuela: Publicado. Universidad De Los Andes.

L. Obregón, J. Pertuz & R. Domínguez (2016), **Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire.** Trabajo de Asenso Publicado: Universidad del Atlántico. Atlántico, Colombia.

Manzano, G. (2017), **Evaluación Técnico-Economica de Opciones para la Sustitución de la Torre de Enfriamiento de la Planta de Procesamiento de Pygas PDVSA Vassa el Tablazo** Trabajo de Grado Publicado: Universidad Rafael Urdaneta Maracaibo, Venezuela.

Orellana, J. (2005). **Ingeniería Sanitaria.** Rosario, Argentina: Publicado: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario.

Paguay, N. Paredes, J y Quisintuña, A (2012) **Termodinámica publicado en**

Paucar, K. y Vivas, M. (1999). **Diseño y Construcción de una Torre de o.** Publicado. Universidad Nacional de Ingeniería Lima, Perú.

Rivera (2016). Un Gran Clásico, Torres de Enfriamiento. [Documento en línea]. Disponible <https://www.0grados.com/gran-clasico-torres-enfriamiento/> [Consulta: mayo 2017, 20].

Rodelca. (2017). **Catálogo de Torres de enfriamiento.** 8-80.Valencia, Venezuela: Rodelca.

Romero, C (2005) **Curso fenómenos de transporte,** Universidad Nacional Experimental del Táchira. Extraído el 7 de octubre de 2008 desde <http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/index.html>

Tamayo y Tamayo. M (1997), El proceso de la investigación científica. México.

Universidad Jose Antonio Páez. (2014). **Clases de Mecánica de los fluidos.** Valencia: Autor. Caraballo Gruber.

Universidad Jose Antonio Páez. (2015). **Clases de Turbomaquinas.** Valencia: Autor. Caraballo Gruber.

Villa, S (2008), **Determinación de Correlaciones Para Tasa Global de Transferencia de Calor y Caída de Presión en un Determinado Relleno de Torre**

de Enfriamiento Utilizando un Equipo Experimental. Trabajo de Grado Publicado.
Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.