



**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE
GIJÓN**

GRADO EN INGENIERÍA

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

**DISEÑO BÁSICO DE TORRE DE REFRIGERACIÓN PARA
EL CONDENSADOR DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE ACERO LÍQUIDO.**

D. Miguel Cotrina Aguadero

TUTOR: D. José Díaz Trapiella

FECHA: Julio 2023

ÍNDICE

1. OBJETO.....	8
2. ANTECEDENTES	10
2.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO AL QUE DA SERVICIO LA TORRE DE REFRIGERACIÓN.....	10
2.1.1.- <i>Siderurgia</i>	10
2.1.2.- <i>Desgasificación y decarburación del acero líquido</i>	11
3. TORRES DE REFRIGERACIÓN: CONCEPTO Y TIPOS	13
3.1.- TIPOS DE TORRES DE REFRIGERACIÓN.....	14
3.1.1.- <i>Clasificación según grado evaporativo</i>	14
3.1.2.- <i>Clasificación según el contacto líquido-aire</i>	17
3.1.3.- <i>Clasificación según el movimiento del aire</i>	18
3.1.4.- <i>Clasificación según el tipo de flujo</i>	24
3.1.5.- <i>Clasificación según el tipo de relleno</i>	26
3.1.6.- <i>Clasificación según el modo de montaje</i>	29
3.1.7.- <i>Clasificación según la disposición</i>	30
4. COMPONENTES DE UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN	32
4.1.- ESTRUCTURA	32
4.1.1.- <i>Balsa de agua fría</i>	32
4.1.2.- <i>Estructura y cerramiento</i>	32
4.1.3.- <i>Distribución de agua caliente</i>	33
4.1.4.- <i>Difusor del ventilador</i>	34
4.1.5.- <i>Relleno</i>	35
4.1.6.- <i>Separador de gotas</i>	35
4.2.- EQUIPO MECÁNICO	36
4.2.1.- <i>Ventilador</i>	36
4.2.2.- <i>Reductor y transmisión</i>	37
4.2.3.- <i>Bomba de impulsión</i>	37
4.3.- EQUIPO ELÉCTRICO	38
4.3.1.- <i>Motor</i>	38
4.3.2.- <i>Control y cableado</i>	38
5. ESTUDIO TÉCNICO.....	39
5.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS	39

5.1.1.- Teoría de Merkel	39
5.1.2.- Integración de la ecuación de Merkel	47
5.1.3.- Curva de demanda del proceso	48
5.1.4.- Curva característica de la torre	49
5.2.- DATOS DE MEDICIÓN EN CAMPO	49
5.3.- ESTUDIO DE DATOS CLIMÁTICOS	50
5.4.- CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL RELLENO DE LA TORRE	51
5.5.- DIMENSIONADO DEL RELLENO DE LA TORRE	55
5.6.- PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA TORRE.....	60
5.6.1.- Acondicionado del terreno	64
5.6.2.- Cimentaciones	64
5.6.3.- Estructura de hormigón y fábrica.....	65
5.6.4.- Estructura metálica	66
5.6.5.- Distribución del agua	67
5.6.6.- Ventilación y bombeo	68
6. ESTUDIO ECONÓMICO	76
6.1.- CÁLCULO DEL COSTE TOTAL	76
6.2.- ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA	79
7. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	82
7.1.- DIMENSIONADO TÉRMICO	82
7.2.- PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACIÓN.....	82
7.3.- COSTE DE EJECUCIÓN	84
7.4.- PLANIFICACIÓN EJECUCIÓN.....	86
8. CONCLUSIONES	88
9. PLANIFICACIÓN DEL TFG	90
10. NOMENCLATURA	92
11. BIBLIOGRAFÍA	98
11.1.- OBJETIVOS Y ANTECEDENTES	98
11.2.- TIPOS DE TORRES DE REFRIGERACIÓN.....	99
11.3.- COMPONENTES DE UNA TORRE	101
11.4.- ESTUDIO TÉCNICO	102
12. ANEXOS	104
12.1.- TABLA DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HÚMEDO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	104

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.- UBICACIÓN DEL CONDENSADOR RH-OB EN TABAZA	8
FIGURA 2.1.-CUCHARA DE ACERO LÍQUIDO Y TROMPAS DE LA INSTALACIÓN RH 12
FIGURA 3.1.-TORRE DE REFRIGERACIÓN SECA.....	14
FIGURA 3.2.- TORRE DE REFRIGERACIÓN EVAPORATIVA.....	15
FIGURA 3.3.-TORRE DE REFRIGERACIÓN MIXTA.....	16
FIGURA 3.4.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE CIRCUITO CERRADO.....	17
FIGURA 3.5.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE CIRCUITO ABIERTO.....	18
FIGURA 3.6.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE ESPRAY VERTICAL.....	19
FIGURA 3.7.-TORRE DE REFRIGERACIÓN HIPERBÓLICA.....	20
FIGURA 3.8.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE TIRO FORZADO	22
FIGURA 3.9.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE TIRO INDUCIDO.....	23
FIGURA 3.10.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE TIRO MIXTO	23
FIGURA 3.11.-TORRE DE REFRIGERACIÓN A CONTRACORRIENTE	24
FIGURA 3.12.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE FLUJO CRUZADO DOBLE	25
FIGURA 3.13.-TORRE DE REFRIGERACIÓN DE FLUJO CRUZADO SIMPLE	26
FIGURA 3.14.-RELLENO LAMINAR PARA TORRE DE REFRIGERACIÓN.....	27
FIGURA 3.15.- RELLENO MIXTO PARA TORRE DE REFRIGERACIÓN	28
FIGURA 3.16.- RELLENO DE GOTEIO PARA TORRE DE REFRIGERACIÓN	28
FIGURA 3.17.-TORRE DE REFRIGERACIÓN PREFABRICADA.....	29
FIGURA 3.18.-TORRE DE REFRIGERACIÓN MONTADA EN CAMPO	30
FIGURA 3.19.-TORRE DE REFRIGERACIÓN CIRCULAR.....	31
FIGURA 4.1.- ESTRUCTURA Y CERRAMIENTO DE UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN	33
FIGURA 4.2.-SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A PRESIÓN	34

FIGURA 4.3.-DIFUSOR DEL VENTILADOR.....	35
FIGURA 4.4.-SEPARADOR DE GOTAS.....	36
FIGURA 4.5.-VENTILADOR DE TIPO AXIAL PARA TORRE DE REFRIGERACIÓN	36
FIGURA 4.6.-BOMBA DE IMPULSIÓN.....	37
FIGURA 5.1.-ESQUEMA DE LAS VARIABLES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO QUE INTERVIENEN EN UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN	40
FIGURA 5.2.-ESQUEMA INICIAL PARA EL PLANTEAMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA DEL MÉTODO MERKEL.....	41
FIGURA 5.3.-REPRESENTACIÓN DE LA DIFUSIÓN DEL AGUA EN EL AIRE SEGÚN EL MÉTODO DE MERKEL	42
FIGURA 5.4.- DIAGRAMA H-T DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL AGUA EN UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN	47
FIGURA 5.5.-REPRESENTACIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA DEL PROCESO	48
FIGURA 5.6.-CURVA DE DEMANDA DEL PROCESO	57
FIGURA 6.1.- COSTES EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL RELLENO (M)	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.-DATOS DE PARTIDA DEL ESTUDIO	9
TABLA 5.1.- MEDICIONES REALIZADAS EN CAMPO EN UNA TORRE CON UN RELLENO DEL MISMO TIPO	50
TABLA 5.2.-RELACIÓN ENTRE NIVEL PERCENTIL ANUAL (NPA) Y NIVEL PERCENTIL ESTACIONAL (NPE).....	51
TABLA 5.3.- RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS EN FUNCIÓN DE LAS MEDIDAS RECOGIDAS	53
TABLA 5.4.-EJEMPLO DE CÁLCULO DE NTU UTILIZANDO LA REGLA DE TRAPECIOS.....	54
TABLA 5.5.-CÁLCULO DEL NTU EN FUNCIÓN DE CADA MEDIDA	54
TABLA 5.6.-DATOS DE PARTIDA SELECCIONADOS	55
TABLA 5.7.-RANGO DE ALTURAS DE RELLENO ELEGIDAS	56
TABLA 5.8.-RESULTADOS INTERSECCIÓN	58
TABLA 5.9.-CÁLCULO DEL ÁREA DE LA TORRE DE REFRIGERACIÓN	59
TABLA 5.10.-VALORES DEL CAUDAL DEL AIRE EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE RELLENO.....	59
TABLA 5.11.-VALORES CONSIDERADOS PARA LA TORRE DE REFRIGERACIÓN	61
TABLA 5.12.-PRECIOS CORRESPONDIENTES A CADA MEDICIÓN	69
TABLA 5.13.-SELECCIÓN BOMBA DE IMPULSIÓN DE AGUA	70
TABLA 5.14.-POTENCIA REQUERIDA DE CADA BOMBA.....	71
TABLA 5.15.-VENTILADORES SELECCIONADOS EN FUNCIÓN DE CADA CAUDAL DEL AIRE.....	72
TABLA 5.16.-POTENCIA REQUERIDA DE CADA VENTILADOR.....	73
TABLA 5.17.-DIMENSIONES CORRESPONDIENTES A CADA MODELO DE VENTILADOR.....	73

TABLA 5.18.-MOTORES SELECCIONADOS EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE LOS VENTILADORES	74
TABLA 6.1.- GASTOS GENERALES	76
TABLA 6.2.-PRESUPUESTO TORRE DE REFRIGERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE RELLENO.....	77
TABLA 6.3.-CONSUMO ENERGÉTICO DEL VENTILADOR	77
TABLA 6.4.- RESUMEN DEL CONSUMO ENERGÉTICO	78
TABLA 6.5.-RESUMEN DEL COSTE ENERGÉTICO	79
TABLA 6.6.-RESUMEN DEL COSTE TOTAL	80
TABLA 6.7.-PARÁMETROS DE DISEÑO PARA RELLENO ELEGIDO	82
TABLA 6.8.-GEOMETRÍA RESULTANTE PARA RELLENO ELEGIDO.....	83
TABLA 6.9.-MEDICIONES Y COSTE TOTAL DE CADA ELEMENTO DE LA INSTALACIÓN.....	85
TABLA 6.10.-RESUMEN DEL TOTAL DE COSTES.....	86

1. Objeto

La refrigeración en una planta de tratamiento de acero siempre ha sido una problemática a la que se han tenido que enfrentar las empresas, tanto a nivel económico como ambiental.

Esto ha provocado que se hayan ido desarrollando diferentes soluciones de forma continua, evaluando los impactos técnicos y económicos que supondrían en función de las características de la instalación en la que se necesitaría implantar.

En este caso de estudio, se trata de realizar el proyecto básico de una torre de refrigeración para el condensador RH-OB de una bomba de vacío perteneciente a una planta de desgasificado y descarburación de acero líquido en Tabaza, determinando la demanda y las condiciones ambientales, la selección de la solución constructiva más apropiada y el dimensionado detallado, tanto del aspecto térmico como de los elementos necesarios de la torre. En la Figura 1.1 se puede observar la localización donde va a ir ubicada:



Figura 1.1.- Ubicación del condensador RH-OB en Tabaza

Los datos de partida que se disponen son los siguientes:

Datos de la instalación	
Ubicación	Tabaza (España)
Coordenadas	43°54'32''N 5°83'36''W
Datos nominales de la torre	
Caudal de agua	2100 m ³ /h
Temperatura de entrada	47 °C
Temperatura de salida	32 °C
Temperatura ambiental (bulbo húmedo)	20 °C

Tabla 1.1.-Datos de partida del estudio

2. Antecedentes

2.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO AL QUE DA SERVICIO LA TORRE DE REFRIGERACIÓN

2.1.1.- Siderurgia

Desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, se utilizan los sistemas de colada continua en combinación con trenes de laminado para la fabricación de acero en su gama de formatos.

El proceso siderúrgico se lleva a cabo en distintas fases desde la extracción del mineral de hierro hasta la obtención de la forma final.

Primero se extrae el mineral de hierro del yacimiento, el cual consta de dos partes:

- El mineral de interés (objeto de la explotación), denominado **mena**;
- Otros minerales que se presentan (impurezas), lo que se denomina **ganga** del mineral.

Para la fabricación del acero se tiene que verter en el alto horno una mezcla de mineral de hierro y un combustible sólido denominado coque, que se obtiene a partir de carbón.

También se añaden materiales calcáreos que eliminan las impurezas del mineral. Una vez separadas las impurezas, parte del carbono del cok se combina con el hierro formando el arrabio.

A continuación, este arrabio se transforma en acero líquido en un proceso en el que se añaden varios materiales, entre ellos chatarra, y en el que se separa el acero puro de la escoria. Una vez conseguido el acero líquido, podrá avanzar a la siguiente etapa del proceso metalúrgico: la metalurgia secundaria

2.1.2.- Desgasificación y decarburación del acero líquido

Son dos procesos de la metalurgia secundaria consistentes en la reducción de los gases y el contenido de carbono en el acero líquido, tal y como se va a explicar a continuación:

2.1.2.1.- Desgasificación del acero

Se trata de un proceso que se le debe aplicar al acero líquido para que se reduzcan las imperfecciones y defectos de este metal. La desgasificación del acero se lleva a cabo comúnmente al vacío, después de que hayan salido del horno y antes de ser vertido en los moldes para hacer lingotes o introducido en una máquina de colada continua.

Existen varios tipos de desgasificación de acero en los que interviene el vacío: la desgasificación en chorro, la desgasificación por recirculación (RH) y desgasificación con tanque (DH). Optar por uno u otro depende de factores como el objetivo de la desgasificación, los costes de inversión y operativos, el tonelaje...

Todos los procesos tienen en común que ocurren en una cámara de vacío, y el vacío se crea mediante eyectores de chorro de vapor de múltiples etapas u otros sistemas modulares, habitualmente combinados con una bomba de vacío de anillo líquido o de tornillo.

- **Desgasificación del acero por chorro:** Consiste en situar el recipiente receptor del acero líquido (cuchara o lingotera) en una cámara de vacío, sobre la que se ajusta la cuchara que contiene el acero líquido. El chorro de acero, por efecto del vacío, se fracciona en gotas que favorecen la eliminación de los gases.
- **Desgasificación del acero por recirculación:** Se basa en hacer circular repetidas veces el acero por un recipiente que actúa de cámara de vacío. La recirculación se consigue mediante inyección de un gas inerte (argón o nitrógeno).
- **Desgasificación del acero con cucharón o tanque:** La cuchara se sitúa previamente en una cámara de vacío. Para facilitar la desgasificación, el acero se remueve por una corriente de gas inerte (argón o nitrógeno) o electromagnéticamente.

2.1.2.2.- Decarburación del acero

La decarburación del acero, o proceso RH tiene como misión reducir el contenido en acero del carbono, desde valores iniciales típicos de 0,5 % hasta valores por debajo del 0,01 %. También se consigue la evaporación de elementos extraños, como el plomo, que pueden alterar las características del acero, incluso aunque se presenten en proporciones muy pequeñas.

En el método RH la cámara de vacío cuenta con dos trompas en la parte inferior, que son unos tubos revestidos de refractario tanto interior como exteriormente. Estos tubos se introducen parcialmente en el baño de acero líquido de la cuchara. En una trompa se inyecta gas inerte, haciendo disminuir de esta manera la densidad del acero en esa zona. Debido a esta menor densidad y a la succión del vacío de la cámara, el acero asciende por esta trompa y desciende (cae por gravedad) por la otra, estableciéndose así una circulación del acero líquido por la cámara de vacío, donde se produce el desgasificado. En este proceso las ferroaleaciones se pueden añadir después del desgasificado. Para que la mezcla sea homogénea se mantiene la circulación del baño durante un tiempo después del desgasificado.



Figura 2.1.-Cuchara de acero líquido y trompas de la instalación RH

3. Torres de refrigeración: concepto y tipos

Los procesos industriales generan energía en forma de calor, en dónde una parte de ella debe ser disipada para conservar el rendimiento y vida útil de los equipos. La disipación de este calor se puede dar directamente al exterior mediante aire atmosférico o un caudal o reserva de agua. Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes como el impacto del vertido térmico o los costes, tanto a nivel ambiental como de equipos. Generalmente, primero se cede el calor a una fuente de agua u otro fluido, que posteriormente disipa el calor al exterior bien mediante aerorefrigeradores o bien mediante torres de refrigeración.

Los aerorefrigeradores disipan el calor sensible a la atmósfera, pero tienen costes iniciales más altos, tanto de los equipos como del consumo eléctrico.

Como alternativa están las torres de refrigeración, que disipan tanto calor sensible como latente a la atmósfera y que presentan como ventajas una temperatura mínima más baja, un menor coste inicial debido a que el equipo es más pequeño, y, por tanto, necesita menor espacio en planta; un menor consumo de la electricidad y una menor presión sonora. Sin embargo, al ser sistemas más complejos, necesitan un mayor mantenimiento y el consumo tanto de bombeo como de agua es mayor.

Como principio básico de operación, las torres de refrigeración son equipos que consiguen un enfriamiento mediante transferencia de masa y calor del agua caliente al aire frío y seco, buscando el mayor contacto entre el agua a enfriar y el aire atmosférico.

3.1.- TIPOS DE TORRES DE REFRIGERACIÓN

3.1.1.- Clasificación según grado evaporativo

En función de cuál sea su grado evaporativo, se distinguen las siguientes torres de refrigeración:

3.1.1.1.- No evaporativas (secas)

En las torres secas no se produce contacto directo entre aire y agua, debido a la completa utilización de las secciones secas de la instalación. Por lo tanto, el agua se enfría debido a la transferencia de calor sensible. Son equivalentes a los aerorefrigeradores.

Las principales ventajas son un control preciso de la temperatura, un consumo de agua casi inexistente y la opción de operar en un rango de temperaturas amplio.

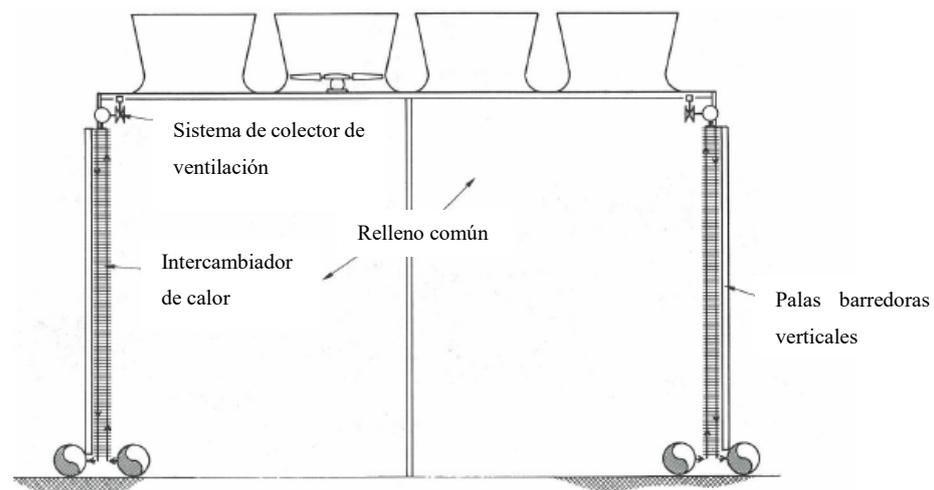


Figura 3.1.-Torre de refrigeración seca

3.1.1.2.- Evaporativas

En las torres evaporativas, el agua proveniente de un proceso que se ha de refrigerar cae por unos difusores que la pulverizan sobre un relleno. El agua se distribuye sobre éste, intercambiando calor con el aire y cae a una balsa donde unas bombas la recogen y vuelve a impulsarla al proceso que tiene que refrigerar. Este tipo de sistemas son los más económicos y los que menor temperatura del agua refrigerada proporcionan, pero para que su instalación sea rentable se requiere de un suministro de agua abundante y a un precio razonable.

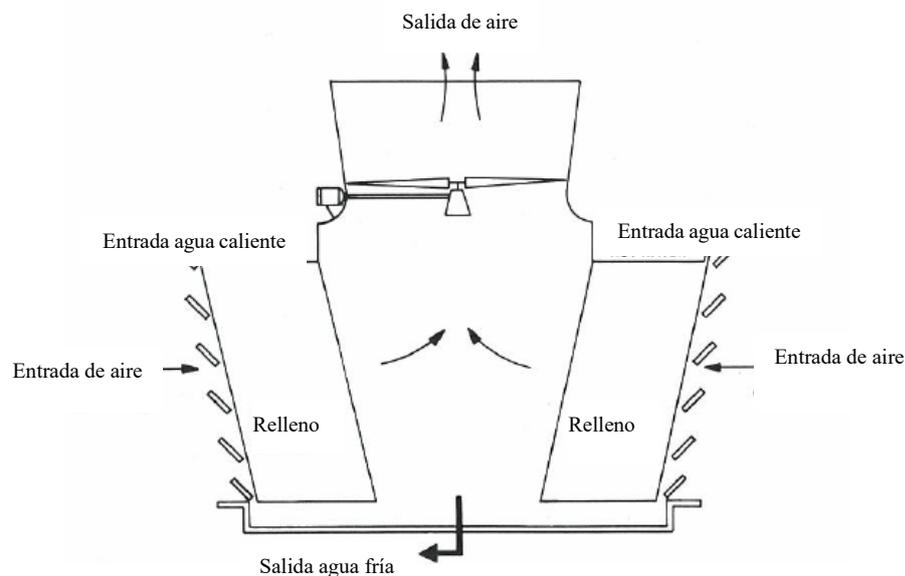


Figura 3.2.- Torre de refrigeración evaporativa

3.1.1.3.- Mixtas

En las torres mixtas se combinan los dos métodos de enfriamiento explicados anteriormente, en el que se consigue un ahorro de agua durante periodos de tiempo donde sea efectivo el enfriamiento por aire, además de tener todas las ventajas de una torre de refrigeración húmeda. De igual manera, con la refrigeración mixta se tendrá una gran versatilidad, puesto que pueden funcionar como

enfriadores por aire en las épocas frías y como enfriadores evaporativos en épocas cálidas. Sin embargo, su principal limitación es su alto coste de inversión.

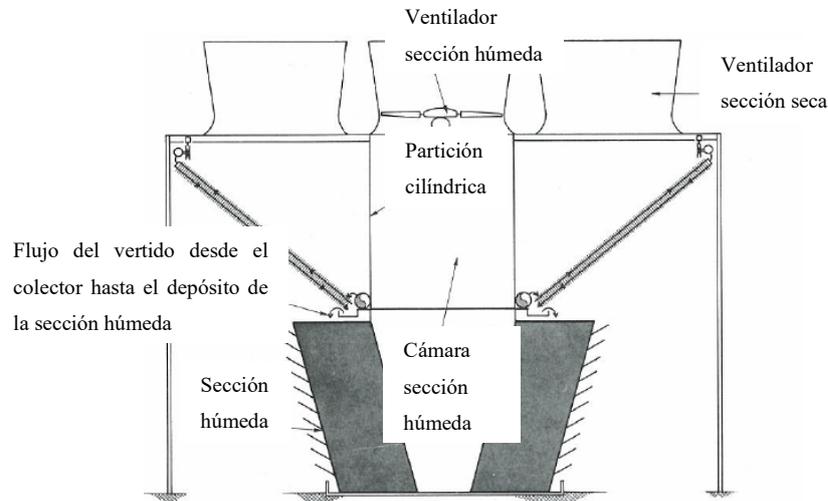


Figura 3.3.-Torre de refrigeración mixta

Se usan para reducir la pluma o penacho de vapor, ahorrar agua y reducir el consumo energético de los ventiladores.

- **Ahorro de agua**

Las torres de refrigeración húmedas consiguen reducir gastos en agua en los procesos de enfriamiento localizados en zonas áridas, que, dependiendo de su uso y localización, permiten ahorros de hasta el 70% en el cómputo anual de agua necesaria para una torre húmeda de similares características. Igualmente, se puede diseñar una torre de este tipo para ahorrar el 100% de gastos de agua en aquellos momentos del año dónde la torre pueda operar en modo seco únicamente.

- **Supresión de penacho**

En algunos casos estas torres de refrigeración mixtas son pensadas únicamente con el objetivo de eliminar este problema muy común que ocurre con las torres de refrigeración húmedas.

Esto ocurre cuando el aire saturado que asciende por la torre se mezcla con el aire ambiental que se encuentra a baja temperatura, más en concreto cuando la

línea de dilución (línea formada por la mezcla de aire cargado de humedad y el aire ambiente) supere la curva de saturación. Este enfriamiento del penacho al entrar en contacto con el aire ambiente hace que se forme aún más vapor de agua en el penacho haciendo que se formen pequeñas gotas y por tanto haciéndolo visible.

En este caso, la torre de refrigeración evaporativa será la opción elegida debido a que el caudal de agua a refrigerar es elevado, siendo en este caso el sistema más económico.

3.1.2.- Clasificación según el contacto líquido-aire

Según este criterio, existen dos tipos:

3.1.2.1.- Cerrado (circuito cerrado)

Este tipo de torres de refrigeración llevan un serpentín por donde pasa el agua que sustituye al relleno de las torres de circuito abierto. Por tanto, en estas instalaciones, el fluido de trabajo no entra en contacto con el aire.

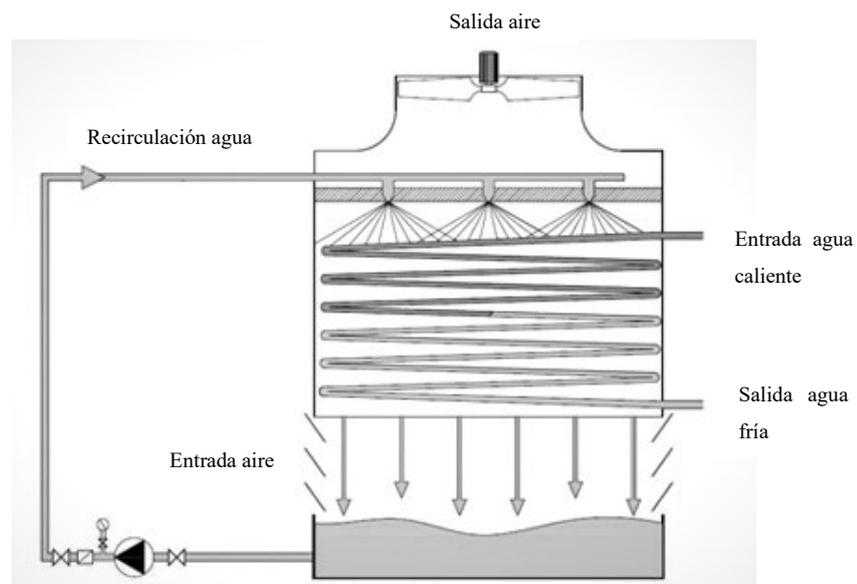


Figura 3.4.-Torre de refrigeración de circuito cerrado

3.1.2.2.- Directo (circuito abierto)

En este tipo de torres de refrigeración el agua entra por la parte superior de la torre y se distribuye de manera uniforme por el relleno mediante pulverizadores entrando en contacto con el aire. Este sistema es el más económico y eficiente de todos los existentes en el mercado, requiere poco espacio para su instalación y tiene un peso menor que las de circuito cerrado. Es por ello por lo que se decide emplear esta opción.

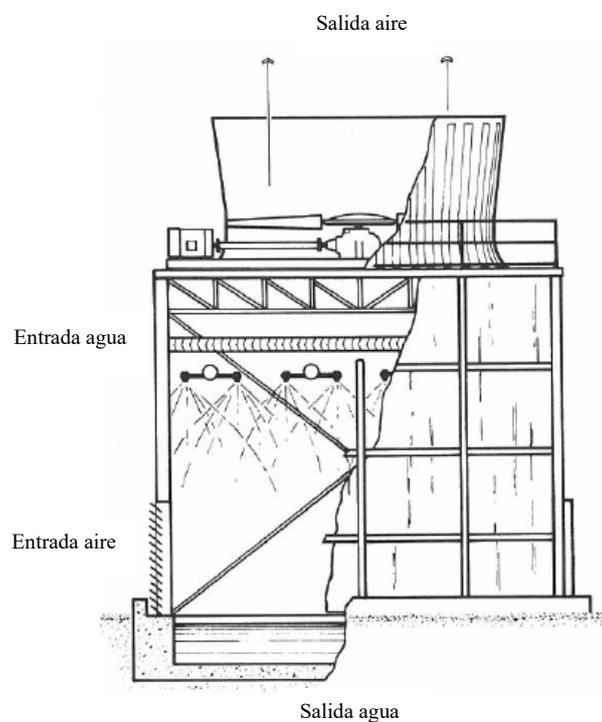


Figura 3.5.-Torre de refrigeración de circuito abierto

3.1.3.- Clasificación según el movimiento del aire

Según el movimiento del aire a través de la torre, existen instalaciones en las que el movimiento del aire se produce por convección natural, otras en las que se usan medios mecánicos y, finalmente, otras que combinan ambas técnicas, añadiendo a una instalación de tiro natural ventiladores para aumentar el flujo de aire.

3.1.3.1.- Tiro natural (sin ventilador)

En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales y se lleva a cabo por espráis o por el diferencial de densidad del aire, sin usar ningún elemento mecánico para crear el tiro. Su funcionamiento se basa en que el aire caliente y húmedo se eleva debido a la menor densidad frente al aire frío y seco. A su vez, se dividirán en los siguientes tipos:

- De espray (flujo paralelo)

Este tipo de torres no tiene una superficie para el intercambio de calor, si no que depende únicamente de la dispersión de agua proporcionada por el sistema de distribución para promover la óptima relación agua-aire. Pueden ser tanto verticales como horizontales, siendo la mayoría cilindros con un pequeño y gradual descenso del diámetro para evitar la recirculación y estabilizar el tiro.

Se utilizan para sistemas donde la temperatura no es crítica y la propia altura de la torre asegura la no recirculación del aire.

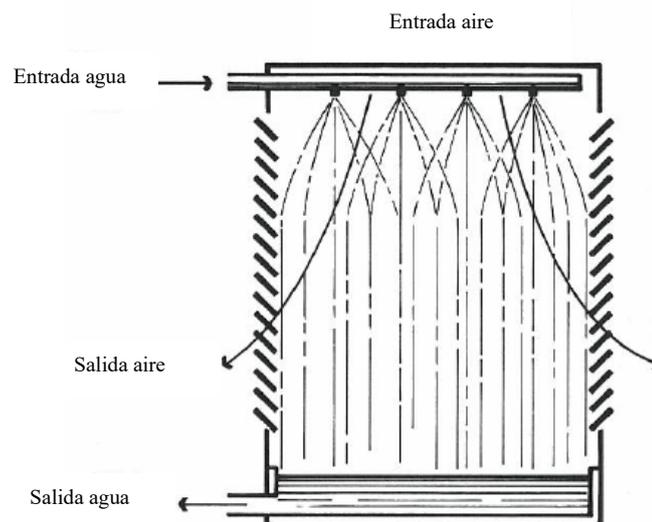


Figura 3.6.-Torre de refrigeración de espray vertical

- **Chimenea (torres hiperbólicas)**

En las torres basadas en el efecto chimenea, el agua pulverizada genera un punto caliente en la parte baja de la torre e induce el movimiento ascendente del aire habitualmente en contracorriente. Se construyen con perfil hiperbólico con el objetivo de mejorar el comportamiento aerodinámico.

Estas instalaciones habitualmente no disponen de separadores de gotas, debido a la elevada pérdida de carga que provocan estos elementos que disminuyen excesivamente el flujo de aire. No obstante, dada su elevada altura y geometría, la emisión de aerosoles es muy limitada.

Las ventajas que se consiguen con esta torre son la capacidad de enfriar grandes masas de agua y la no necesidad de utilizar mecanismos externos que consuman energía para favorecer el movimiento del aire. Sin embargo, la construcción de estas torres es más complicada y costosa y el tiro de aire es más fuerte que en otro tipo de torres.

Este sistema se emplea casi exclusivamente en grandes potencias, como en centrales de producción de energía eléctrica, sistemas que necesitan mover y refrigerar grandes cantidades de agua.

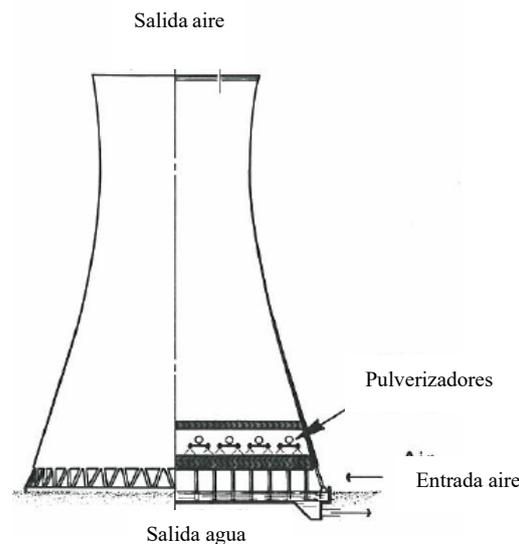


Figura 3.7.-Torre de refrigeración hiperbólica

3.1.3.2.- Tiro mecánico

Las torres de tiro mecánico emplean ventiladores para desplazar el aire a través del relleno. Gracias a ello es necesaria una menor altura de la torre, derivando en una menor altura de bombeo para llevar el agua caliente a la parte superior de la torre. Igualmente, esto hace que sea necesario emplear rellenos más compactos y eficaces. Además, la velocidad del viento y la dirección de este no condicionan el rendimiento de la torre, viéndose este solo afectado para la temperatura de bulbo húmedo del aire.

Sin embargo, también presentan una serie de inconvenientes, ya que es necesario un consumo eléctrico asociado a los ventiladores usados en este tipo de torres. Además, se deben emplear eliminadores de gotas de alto rendimiento, para compensar el mayor arrastre de agua pulverizada provocada por la mayor velocidad de paso de aire, que, a su vez, generan una pérdida de carga que debe ser compensada por los ventiladores.

Se elije en este caso una torre de tiro mecánico debido a que se consigue tener un control más estricto de la temperatura fría de salida requerida y se alcanza un mejor aprovechamiento de la temperatura de bulbo húmedo requerida.

Las torres de tiro mecánico se clasifican a su vez en torres de tiro inducido y de tiro forzado, en función de la disposición de los ventiladores.

- **Tiro forzado**

La torre de tiro forzado, mostrada en la Figura 3.8, tiene el ventilador, la bandeja y la tubería ubicados dentro de la estructura de la torre. En este tipo, el ventilador está ubicado en la base.

Durante la operación, el ventilador empuja aire a baja velocidad horizontalmente a través del relleno de la torre, y después verticalmente contra el flujo descendente de agua que fluye a ambos lados del ventilador. Los eliminadores de gotas ubicados en la parte superior de la torre eliminan el agua que es arrastrada

con el aire. Los ventiladores trabajan principalmente con aire seco, minimizando problemas de erosión y condensación de agua.

Sin embargo, el tamaño del ventilador está limitado y el ruido en este tipo de torres es mayor, siendo necesario el uso de atenuantes. Además, pueden presentar un gran problema en función de la climatología del lugar de la instalación, si las temperaturas son muy bajas en invierno.

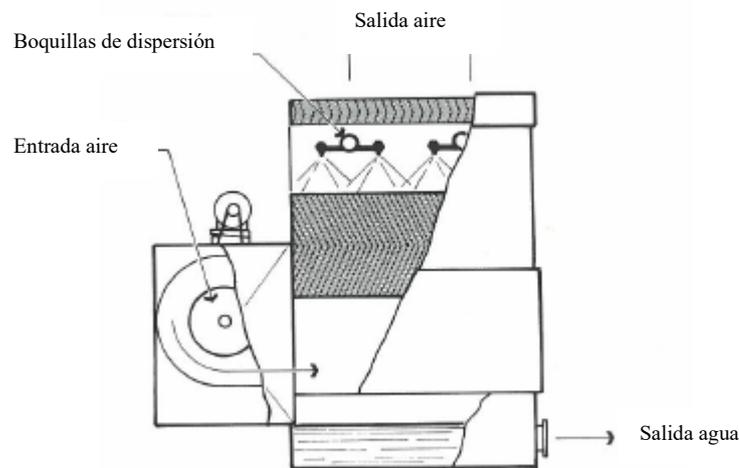


Figura 3.8.-Torre de refrigeración de tiro forzado

- **Tiro inducido**

La torre de tiro inducido que se muestra en la Figura 3.9 tiene uno o más ventiladores, ubicados en la parte superior. Estos ventiladores atraen el aire hacia arriba, en contra del flujo descendente de agua que fluye alrededor de la cubierta. Como el flujo de aire es opuesto al flujo de agua, el agua a menor temperatura de la parte inferior está en contacto con el aire más seco, mientras que el agua a mayor temperatura de la parte superior está en contacto con el aire más húmedo. Esto hace que la transferencia sea más eficiente.

Se escoge esta opción debido a que el flujo de agua que se debe de enfriar es grande, siendo las instalaciones de tiro inducido las más indicadas para cumplir con esta función.

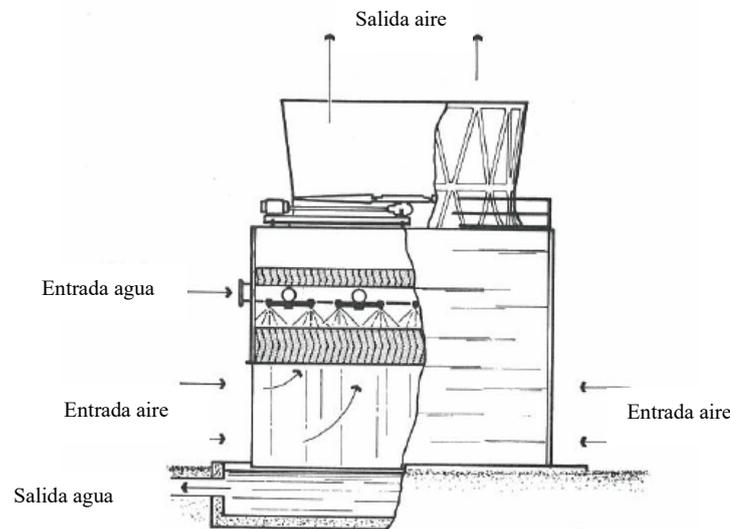


Figura 3.9.-Torre de refrigeración de tiro inducido

3.1.3.3.- Tiro mixto

Este tipo de torres están equipadas con ventiladores de tiro mecánico para aumentar el flujo de aire. Por lo tanto, también se pueden denominar torres de tiro natural con ventilador asistido. El objetivo de este diseño es minimizar la potencia requerida para mover el aire con el menor impacto posible en el coste del equipo. Si el diseño es el adecuado, solo sería necesario utilizar los ventiladores en periodos de máxima demanda.

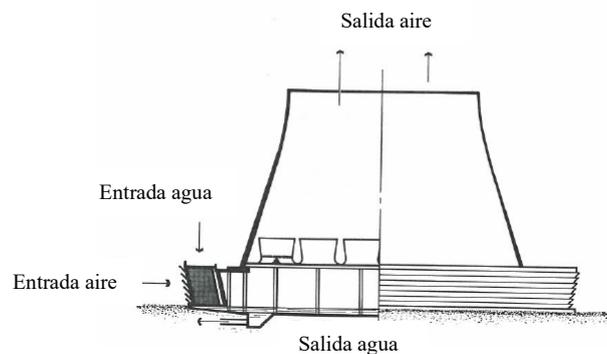


Figura 3.10.-Torre de refrigeración de tiro mixto

3.1.4.- Clasificación según el tipo de flujo

Según la dirección de las corrientes de aire y de agua en la torre, se puede tener flujo a contracorriente o flujo cruzado.

3.1.4.1.- Contracorriente

En los equipos de flujo a contracorriente, el aire se mueve verticalmente hacia arriba atravesando la torre, opuesto al flujo descendente de agua. Como consecuencia, se logra un mayor rendimiento respecto a las de flujo cruzado, debido a que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, además de favorecer la recirculación del agua. Asimismo, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se logra reducir en buena medida la altura de entrada del aire, y, debido a su diseño, la exposición del agua dentro de estas torres a la luz solar está limitada, lo que retrasa la producción de algas.

Sin embargo, la alta velocidad con la que entra el aire hace que exista el peligro de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática, y, como consecuencia, en un incremento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

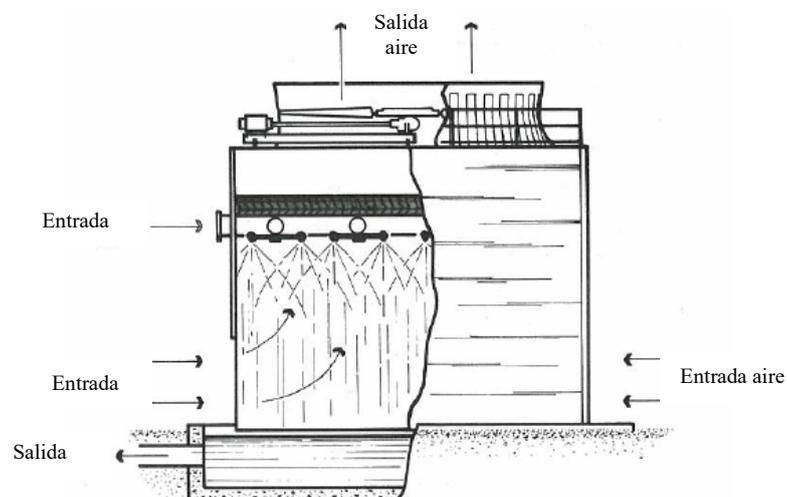


Figura 3.11.-Torre de refrigeración a contracorriente

3.1.4.2.- Cruzado

En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular con respecto al agua que desciende. Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, puesto que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. El mantenimiento de estas torres es más sencillo que en el caso de las torres a contracorriente debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los diferentes componentes internos de la torre.

No obstante, la principal desventaja de estas torres es que no son aconsejables para aquellos casos en los que se requiera un alto rango térmico y un valor de aproximación pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.

Las torres de flujo cruzado a su vez se dividen en dos grupos:

- **Doble flujo**

En este tipo de equipos, el ventilador induce aire a través de dos entradas y a lo largo de dos lechos de relleno.

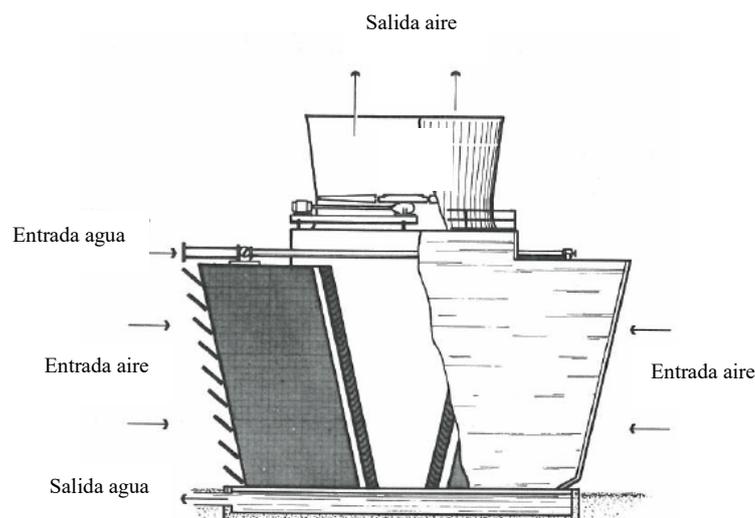


Figura 3.12.-Torre de refrigeración de flujo cruzado doble

- **Flujo simple**

Este tipo de torre solo tiene una entrada de aire y un lecho de relleno, quedando los otros tres lados de la torre tapados. Las torres de flujo sencillo tienen su uso en ubicaciones en las cuales las corrientes de aire están disponibles únicamente en una dirección.

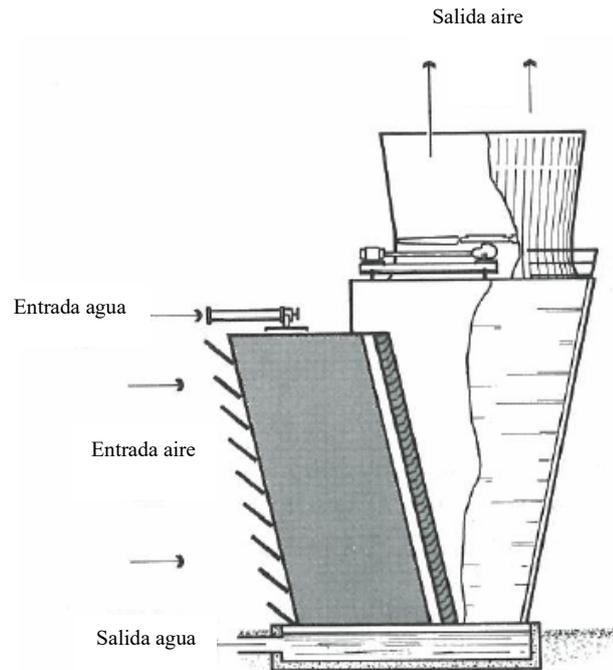


Figura 3.13.-Torre de refrigeración de flujo cruzado simple

Una vez analizados todos los posibles flujos del aire y del agua a través de la torre, el que mejor se adapta a la torre diseñada es la de flujo a contracorriente, debido a que favorece la recirculación y el volumen de enfriado es mayor, logrando por tanto una mayor eficiencia.

3.1.5.- Clasificación según el tipo de relleno

El relleno en la torre de refrigeración es el lugar donde se produce el intercambio de calor entre el agua y el aire para la reducción de la temperatura del agua. En función del tipo de relleno, existen los siguientes tipos de torres de refrigeración:

3.1.5.1.- Laminar

Las torres que tienen este relleno consiguen una gran superficie de contacto aire-agua, siendo el que más rendimiento consiguen. Este se fabrica en polipropileno (PP) que tiene muchas ventajas sobre otros materiales. Admite temperaturas de 80°C, las placas están soldadas por termofusión, es mucho más resistente y duradero que el policloruro de vinilo (PVC) y al no ser tóxico, su reciclaje es más sencillo. En función de la altura de onda, puede ser ideal para aguas limpias debido a su gran eficiencia, e incluso, para alturas grandes, admite aguas ligeramente cargadas de sólidos.

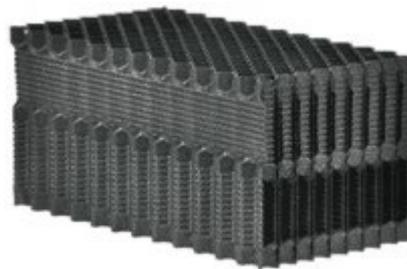


Figura 3.14.-Relleno laminar para torre de refrigeración

3.1.5.2.- Mixto (splashtube)

Las instalaciones que usan el relleno mixto se emplean para enfriar aguas muy cargadas de partículas sólidas que podrían llegar a obturar un relleno laminar. La suciedad es fácilmente arrastrada por la misma agua a enfriar y el relleno permanece limpio, consiguiéndose un rendimiento superior al relleno de goteo. Este relleno está formado por tubos helicoidales de polietileno (PE) y realiza el enfriamiento del agua sobre su superficie combinando el modo laminar y de goteo. Es muy resistente y permite limpiezas severas a presiones elevadas. Admite temperaturas de hasta 75°C. Por su naturaleza geométrica se adapta a cualquier base de torre instalada sobre una malla soporte de acero inoxidable.



Figura 3.15.- Relleno mixto para torre de refrigeración

3.1.5.3.- Goteo

Las torres de refrigeración con relleno de goteo están pensadas para aguas muy contaminadas. Este relleno está compuesto de elementos en forma de perfiles, sustentados por una malla de acero inoxidable, o en forma de rejillas, ambos montados al tresbolillo, contruidos en materiales plásticos poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o Polipropileno (PP).



Figura 3.16.- Relleno de goteo para torre de refrigeración

El relleno buscado que más se adecúa a los parámetros de diseño de la torre de refrigeración que se quiere construir es el de goteo, ya que el agua que se va a tener que enfriar puede presentar gran cantidad de partículas, lodos y aceites.

3.1.6.- Clasificación según el modo de montaje

Según su construcción, las torres de refrigeración se dividen en dos tipos:

3.1.6.1.- En fábrica

Las torres de refrigeración construidas en fábrica, o también llamadas prefabricadas, se someten a un montaje virtualmente completo en su punto de fabricación y se envían al lugar de uso en el menor número de piezas que sea posible. Además, no suelen superar los 2250 m³/h de capacidad, por lo que son torres de pequeño tamaño. La mayoría de ellas están hechas de metales de construcción (normalmente acero galvanizado o acero inoxidable) o resina reforzada con fibra de vidrio (FRP).

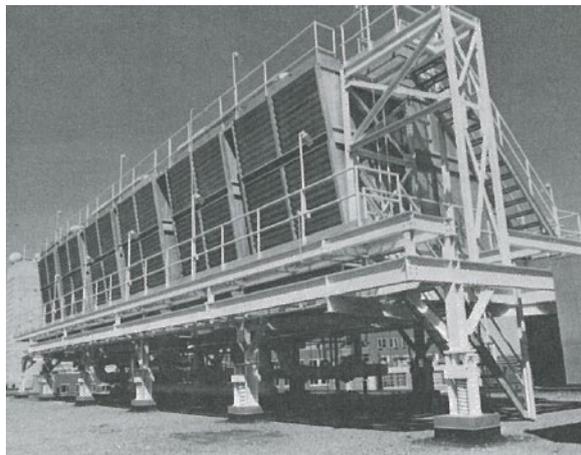


Figura 3.17.-Torre de refrigeración prefabricada

3.1.6.2.- En obra

Las torres de refrigeración de montaje en obra son aquellas en las que la actividad principal de construcción ocurre en el lugar en el que van a ser usadas.

Todas las torres de gran tamaño y muchas de las de menor tamaño son construidas en su emplazamiento.

La torre de refrigeración que se desea construir debe de tener un montaje en obra, debido a las dimensiones y las condiciones de diseño que hace que sea más económico, sencillo y con una planificación más corta.

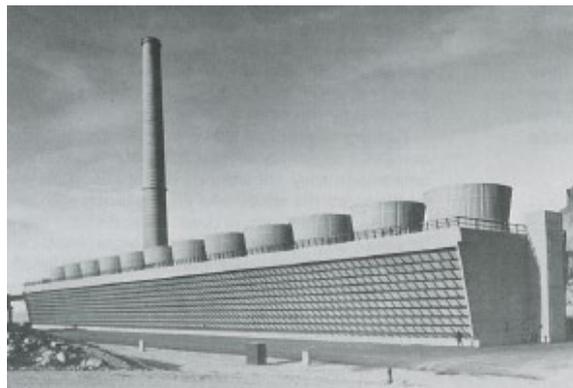


Figura 3.18.-Torre de refrigeración montada en campo

3.1.7.- Clasificación según la disposición

Existen dos tipos de instalaciones en función de la forma:

3.1.7.1.- Rectilíneas

Estas torres se construyen en forma celular, aumentando de forma lineal la longitud y el número de celdas necesarias para lograr un rendimiento térmico específico. La Figura 3.18 representa una instalación de este tipo.

3.1.7.2.- Circulares

Estas torres son esencialmente redondas sobre el plano, con los ventiladores agrupados lo más cerca posible del punto central de la torre. Las torres de varias

caras, como las torres octogonales de tiro mecánico (OMD) también se incluyen en la clasificación general de torres circulares.

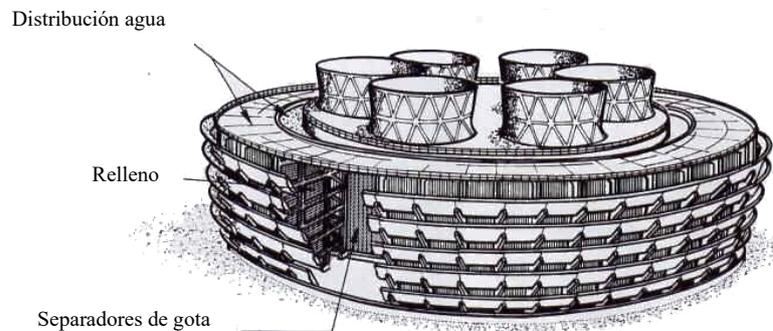


Figura 3.19.-Torre de refrigeración circular

Finalmente, se elige el diseño rectilíneo, en vista de que se obtiene un rendimiento alto con una implementación más sencilla, reduciendo problemas de mantenimiento.

Por tanto, después de este proceso de selección, se obtiene que el sistema que se va a proyectar es una torre de refrigeración evaporativa, abierta, con ventilador axial de tiro inducido, con flujo a contracorriente, con un relleno de goteo, montada en obra y con una disposición lineal.

4. Componentes de una torre de refrigeración

La torre de refrigeración tipo que se quiere construir se forma a través de un conjunto de componentes con características particulares para alcanzar dicha finalidad. Se divide en tres bloques:

4.1.- ESTRUCTURA

La estructura de una torre de refrigeración debe soportar y proteger, durante largos periodos de tiempo, cargas impuestas por el peso (componentes de la torre, agua de circulación, hielo, nieve y ensuciamiento), el viento, el mantenimiento y las actividades sísmicas. Además, debe ser capaz de funcionar en un abanico amplio de condiciones atmosféricas externas y resistir los efectos corrosivos de la alta humedad y constante oxigenación.

4.1.1.- Balsa de agua fría

Sirve como un recipiente para acumular el agua fría resultante del proceso. Se sitúa en la parte inferior de la estructura, actuando como base estructural de la torre, con posibilidad de tener una profundidad variable.

Por otra parte, la balsa debe ser accesible para limpiezas, para la eliminación de los lodos producidos, y debe de dar protección a la zona de aspiración de las bombas, en función de la altura y filtrado.

4.1.2.- Estructura y cerramiento

Sirve para conducir el aire a través de la torre y para sustentar los equipos y el relleno de ella.

La estructura de la torre, formada por vigas y pilares, está realizado con hormigón en la obra o prefabricado.

Por otro lado, el cerramiento, también realizado con hormigón en la obra o prefabricado, debe ser lo suficientemente resistente como para evitar roturas y además, se consigue que sea opaco, evitando la entrada de luz, y por consiguiente, reduciendo la proliferación de algas, hongos y bacterias.

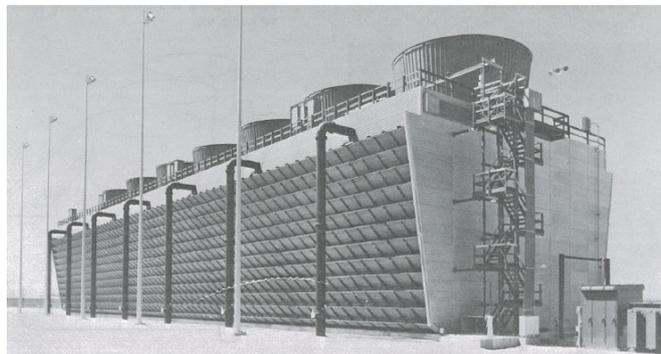


Figura 4.1.- Estructura y cerramiento de una torre de refrigeración

4.1.3.- Distribución de agua caliente

El sistema de distribución de agua caliente debe distribuir uniformemente el agua sobre el relleno y ser capaz de soportar variaciones en el caudal, manteniendo un correcto funcionamiento. Además, debe tener periodos de vida largos, sin necesidad de tener un mantenimiento especial. Igualmente, debe de ser sencillo de montar, sin tener un peso excesivo.

El sistema de distribución está compuesto por tuberías o canales abiertos, tanto de plástico como de acero galvanizado, en los que se montan orificios calibrados con platos difusores o boquillas de pulverización.

Este elemento puede ser a presión o por gravedad. El sistema por gravedad se emplea normalmente en torres de flujo cruzado, mientras que en flujo a contracorriente se utiliza usualmente la distribución mediante presión.

Por lo tanto, debido a los condicionantes que influyen en la torre a dimensionar, se elige el sistema por presión, teniendo las siguientes características:

- Sistemas de platos difusores dirigidos hacia abajo.
- Menor diámetro en las gotas generadas.
- Reparto de agua uniforme y homogéneo incluso con aguas cargadas
- Mayor rendimiento de la torre de refrigeración



Figura 4.2.-Sistema de distribución a presión

4.1.4.- Difusor del ventilador

Este elemento transforma parte de la presión dinámica del ventilador en presión estática, minimizando la recirculación y la interferencia producida. Además, protege las palas del ventilador y debe de haber un mínimo huelgo entre la pala y el difusor.

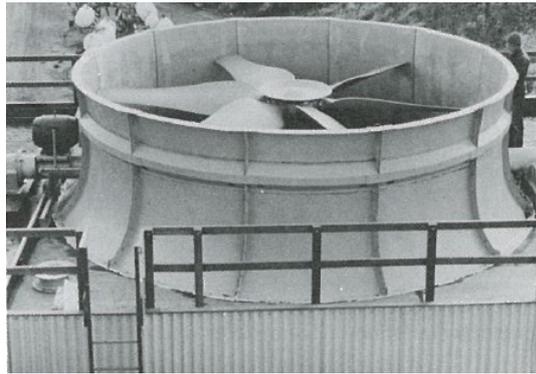


Figura 4.3.-Difusor del ventilador

4.1.5.- Relleno

El relleno de las torres tiene como misión maximizar el contacto agua-aire, tanto en superficie como en tiempo, minimizando la restricción al paso del aire y consiguiendo una mayor tasa de disipación del calor. Como ya ha explicado en el punto 3.2.5, los hay de tipo laminar, mixto o de goteo, siendo este último el elegido, debido a que es el que mejor se adapta a las condiciones de diseño, ya que el agua a refrigerar presentará un alto nivel de suciedad.

4.1.6.- Separador de gotas

La misión principal consiste en evitar que las pequeñas gotas de agua arrastradas por el aire salgan de la torre. Induce cambios bruscos en la dirección de la corriente de aire, provocando que las gotas se depositen sobre la lámina de separador de gotas haciéndolas volver al interior. Este efecto reduce las pérdidas de agua, evita posibles daños a equipos adyacentes y además homogenizan el flujo de aire a la salida del relleno manteniendo prácticamente constante y uniforme el flujo de aire a través de este.

Los materiales empleados actualmente son los mismos que para los rellenos, aunque actualmente se tiende a los materiales plásticos.



Figura 4.4.-Separador de gotas

4.2.- EQUIPO MECÁNICO

Está compuesto tanto por el ventilador como por la bomba de impulsión. Además, también se incluye tanto el reductor como la transmisión del ventilador. El equipo mecánico es muy importante ya que la rotura de uno de estos elementos supondría la parada de la torre de refrigeración.

4.2.1.- Ventilador

En este caso, se elige un ventilador de tipo axial, siendo el que mejor se adapta al diseño elegido, ya que determina la mejor operación y el menor consumo del sistema.



Figura 4.5.-Ventilador de tipo axial para torre de refrigeración

4.2.2.- Reductor y transmisión

El reductor es un dispositivo situado entre el motor y el ventilador, que se utiliza para reducir la velocidad de giro y aumentar el par para satisfacer las necesidades de trabajo. Son fundamentales las características de rigidez y torsión, así como la resistencia mecánica al ambiente de trabajo para asegurar una larga vida de este elemento.

4.2.3.- Bomba de impulsión

Esta máquina es la encargada de impulsar el agua desde la zona inferior de la torre de refrigeración hasta su parte superior, moviendo gran cantidad de líquido en poco tiempo.

Está compuesta por un motor que activa un rodete con un conjunto de paletas. Estas paletas impulsan el líquido y lo fuerzan a salir a través de un conducto de salida a una mayor presión que la de la entrada.

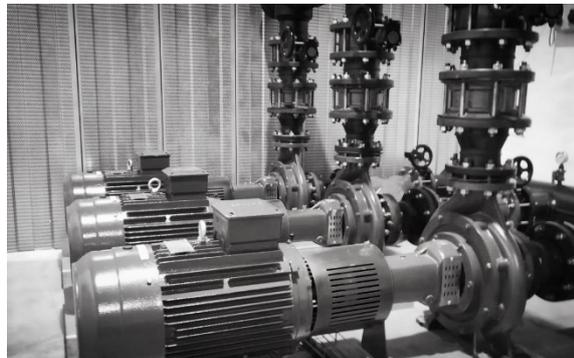


Figura 4.6.-Bomba de impulsión

4.3.- EQUIPO ELÉCTRICO

El equipo eléctrico está formado por el motor tanto del ventilador como de la bomba de impulsión de agua, así como del control y cableado de todo el equipo.

4.3.1.- Motor

Tanto los ventiladores como las bombas utilizan motores eléctricos y las dimensiones, protección y estanqueidad, deben ser las correctas para asegurar una larga vida de estos. Además, la alta humedad de la torre y el contacto con el agua, nieve, niebla, polvo y humos químicos hacen necesarios motores que puedan operar en condiciones severas.

4.3.2.- Control y cableado

Los motores van acompañados de componentes de control como fusibles, interruptores no fusibles y arrancadores. Además, incluye todo el cableado eléctrico que alimenta tanto a los motores como a los componentes mecánicos.

5. Estudio técnico

Para realizar el dimensionado térmico de la torre, es necesario estudiar los fenómenos de transferencia de calor y masa, plantear las ecuaciones que los representan y definir los métodos de cálculo necesarios para su resolución.

5.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1.1.- Teoría de Merkel

En una torre de refrigeración tiene lugar simultáneamente la transferencia tanto de calor como de materia. En la década de los 1920, Frederick Merkel simplificó el problema combinando ambos procesos en uno cuya fuerza impulsora es la entalpía, pero con ciertas limitaciones y errores a la hora de representar los procesos físicos a largo del relleno.

Su trabajo permaneció prácticamente olvidado hasta los años 40 en los que se recuperó y empezó a utilizar. Desde entonces, la teoría inicial de Merkel no ha dejado de perfeccionarse gracias al desarrollo de los ordenadores y el cálculo numérico.

Las simplificaciones cruciales del método de Merkel son:

- El Factor de Lewis es igual a uno.
- El aire a la salida de la torre es saturado y está únicamente caracterizado por su entalpía.
- La reducción de agua líquida por evaporación es despreciada en el balance energético.

Como se puede ver en la Figura 5.1, desde la parte superior de la torre se vierte agua caliente, que desciende por el relleno, donde en forma de láminas y/o gotas entra en contacto con el aire ascendente hasta que llega a la parte inferior de la torre.

Siendo las variables mostradas en la imagen las siguientes:

- caudal de agua: L
- a una temperatura inicial de agua: t_1 (HWT, Temperatura de agua caliente)
- caudal de aire (seco): G
- temperatura y humedad iniciales del aire: t_{a1} , w_{a1} (WBT, Temperatura de bulbo húmedo)
- temperatura final del agua: t_2 (CWT, Temperatura de agua fría)

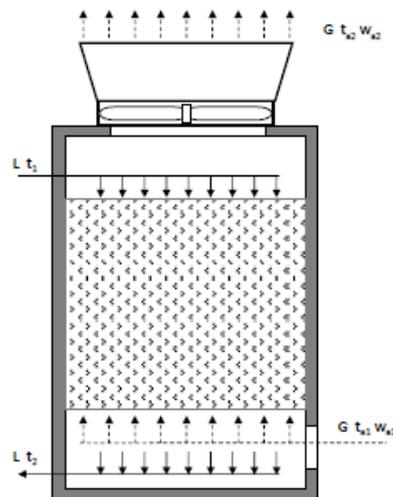


Figura 5.1.-Esquema de las variables de los fluidos de trabajo que intervienen en una torre de refrigeración

Se pretende calcular la evolución de las temperaturas en el sistema formado por el agua y el aire en el interior de la torre, partiendo de una serie de hipótesis iniciales:

- Sistema adiabático en su conjunto
- No se consideran las variaciones de energía cinética y potencial ni del agua ni del aire.
- Flujo unidimensional según el eje vertical de la torre
- Se desprecian las pérdidas por evaporación en el balance térmico del agua líquida (menores de un 3%)

Como primer paso, se plantea el balance de energía en cada fase en una rebanada infinitesimal de espesor dz , tal como se puede observar en la Figura 5.2. Se trabaja por unidad de superficie en planta de la torre.

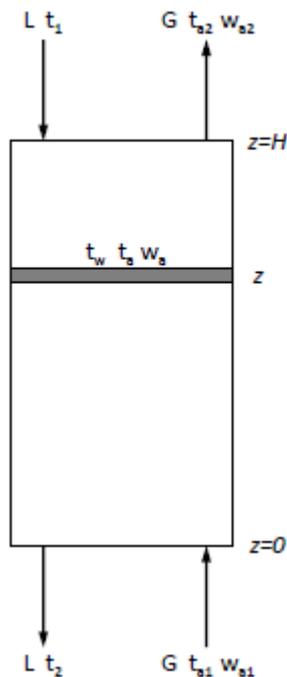


Figura 5.2.-Esquema inicial para el planteamiento del balance de energía del método Merkel

Cabe destacar que no se modeliza la difusión del aire en el agua, sólo la vaporización y difusión del agua en el aire. Se considera una interfase formada por aire saturado de humedad y a la misma temperatura que el agua, reflejado en la Figura 5.3.

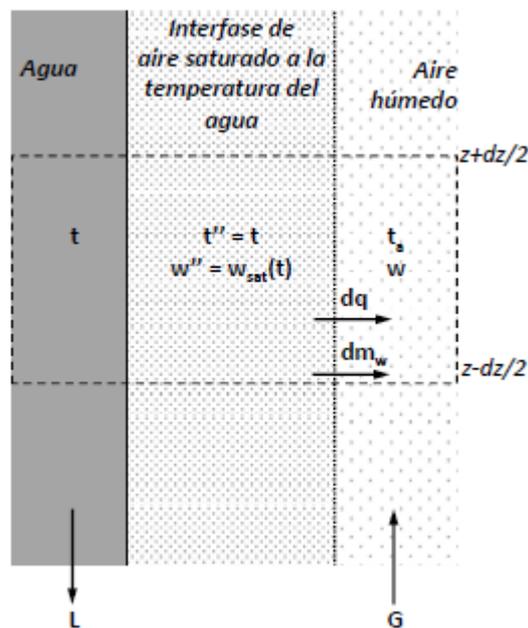


Figura 5.3.-Representación de la difusión del agua en el aire según el método de Merkel

El calor cedido por el agua, dq , es igual al calor ganado por el aire e igual al calor transferido al aire desde la interfase. Dicha interfase está en equilibrio con el agua y se puede plantear:

$$dq = dq_s + dq_l \quad (5.1)$$

Pudiendo ser desarrollado dq_s y dq_l (calor sensible y latente) de la siguiente manera:

$$dq_s = K_G \cdot (t - t_a) \cdot dA \quad (5.2)$$

$$dq_l = \lambda \cdot dm_w = \lambda \cdot K' \cdot (w'' - w) \cdot dA \quad (5.3)$$

Siendo las variables mostradas en las ecuaciones las siguientes:

- Calor total, sensible y latente, transferidos de la interfase al aire $\left(\frac{W}{m^2}\right)$: dq, dq_s, dq_l
- Coeficiente global de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$: K_G
- Temperatura de la interfase K y del aire: t, t_a
- Área de intercambio por cada metro cuadrado de planta de la torre: dA
- Flujo másico de agua transferido de la interfase al aire (por m^2 de planta de la torre): dm_w
- Entalpía de vaporización del agua $\left(\frac{kJ}{kg_w}\right)$: λ
- Humedad absoluta de la interfase y del aire $\left(\frac{kg_w}{kg_{gas}}\right)$: w'', w
- Coeficiente de transferencia de masa en términos de diferencia de humedad absoluta $\left(\frac{\frac{kg_w}{s}}{m^2 \cdot \frac{kg_w}{kg_{gas}}}\right)$: K'

Sustituyendo (5.2) y (5.3) en (5.1), y considerando una capacidad calorífica constante para el aire húmedo, c_{pa} $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K}\right)$, se obtiene lo siguiente:

$$dq = K_G \cdot (t - t_a) \cdot dA + \lambda \cdot K' \cdot (w'' - w) dA \quad (5.4)$$

$$dq = \frac{K_G}{c_{pa}} \cdot (c_{pa} \cdot t - c_{pa} \cdot t_a) \cdot dA + K' \cdot (\lambda \cdot w'' - \lambda \cdot w) dA \quad (5.5)$$

Asimismo, tal y como se había explicado anteriormente, una de las simplificaciones cruciales de la teoría de Merkel se basa en considerar que el factor de Lewis se aproxima a la unidad en un sistema aire-agua, lo que permite renombrar $\frac{K_G}{c_{pa}}$ y K' simplemente como K :

$$L_{ef} = \frac{K_G}{c_{pa} K'} \approx 1 \rightarrow K = \frac{K_G}{c_{pa}} = K' \quad (5.6)$$

Por tanto, uniendo (5.5) y (5.6), se consigue agrupar los términos de calor sensible y latente en uno solo:

$$dq = K \cdot [(c_{pa} \cdot t + \lambda \cdot w'')] - (c_{pa} \cdot t_a + \lambda \cdot w)] dA$$

$$dq = K \cdot (h'' - h_a) dA \quad (5.7)$$

Es habitual expresar el área de intercambio en términos del área de transferencia por unidad de volumen que posee el relleno empleado:

$$dA = a \cdot dV \quad (5.8)$$

Con ello, se obtiene finalmente:

$$dq = K \cdot a \cdot (h'' - h_a) dV \quad (5.9)$$

Siendo las variables mostradas en las ecuaciones las siguientes:

- Calor total, sensible y latente, transferidos de la interfase al aire $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$: dq
- Coeficiente de transferencia de masa en términos de diferencia de humedades absolutas $\left(\frac{\frac{kg_w}{s}}{m^2 \cdot \frac{kg_w}{kg_{as}}}\right)$: K
- Área específica de intercambio del relleno $\left(\frac{m^2}{m^3}\right)$: a
- Entalpía específica de la interfase y del aire $\left(\frac{kJ}{kg_{as}}\right)$: h'' , h_a
- Volumen del relleno por cada metro cuadrado de planta de la torre $\left(\frac{m^3}{m^2}\right)$: dV

Por otro lado, el calor transferido es la energía que pierde el agua y que gana el aire:

$$L \cdot c_{pw} \cdot dt = K \cdot (h'' - h_a) \cdot a \cdot dV = G \cdot dh_a \quad (5.10)$$

Siendo las variables utilizadas las siguientes:

- Capacidad calorífica del agua $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_w \cdot \text{K}}\right)$: c_{pw}
- Temperatura del agua (K): dt
- Caudal de agua por m^2 de planta de la torre $\left(\frac{\text{kg}_w}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right)$: L
- Caudal de aire por m^2 de planta de la torre $\left(\frac{\text{kg}_{as}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right)$: G

Despejando en la expresión anterior (5.10) e integrando para toda la torre, se llega el siguiente resultado:

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{c_{pw}}{(h'' - h_a)} \cdot dt \quad (5.11)$$

Siendo la primera parte de la ecuación $\left(\frac{K \cdot a \cdot V}{L}\right)$ parámetros de la torre que debe tener para cumplir con la demanda, es decir, para que se dé la igualdad:

- Característica del relleno $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^3}\right)$: K
- Volumen del relleno $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}\right)$: V
- Carga de agua $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right)$: L
- Área específica de intercambio del relleno $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}\right)$: a

La segunda parte $\left(\int_{t_2}^{t_1} \frac{c_{pw}}{(h'' - h_a)} \cdot dt\right)$ es función exclusiva de las condiciones en las que se especifica que va a trabajar la torre: **HWT**, **CWT**, **WBT** y **L/G** y no depende de ninguna característica de la torre concreta.

Asimismo, se trata de un grupo adimensional de variables conocido como **NTU** (Número de Unidades de Transferencia):

$$NTU = \frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{c_{pw}}{(h'' - h_a)} \cdot dt \quad (5.12)$$

Siendo NTU una medida del grado de dificultad del proceso, ya que nos indica cuantas veces la fuerza impulsora del proceso ($h'' - h_a$) cabe en el efecto que se desea conseguir ($c_{pw} \cdot dt$).

El NTU tiene una gran importancia, ya que cuanto mayor sea el NTU, más difícil será el proceso, ya que se necesitará una torre más grande para cumplir con la demanda o menos agua se podrá procesar.

Por tanto, según se ha visto, se alcanzará un punto de funcionamiento en el que siempre ambos términos se igualan:

$$NTU_{ava} = \frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{c_{pw}}{(h'' - h_a)} \cdot dt = NTU_{req} \quad (5.13)$$

Siendo cada término lo siguiente:

- Coeficiente disponible o característica de la torre: **NTU_{ava}**

$$NTU_{ava} = \frac{K \cdot a \cdot V}{L} \quad (5.14)$$

- Coeficiente requerido o demanda: **NTU_{req}**

$$NTU_{req} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{c_{pw}}{(h'' - h_a)} \cdot dt \quad (5.15)$$

5.1.2.- Integración de la ecuación de Merkel

Con el fin de obtener una idea clara del significado de la fuerza impulsora y el grado de dificultad requerido por el proceso (NTU), se va a analizar gráficamente la integral de Merkel, utilizando el diagrama (h-t) del proceso, es decir, h'' (interfase) y h_a frente a t (temperatura de la interfase = temperatura del agua), tal y como se puede ver a continuación:

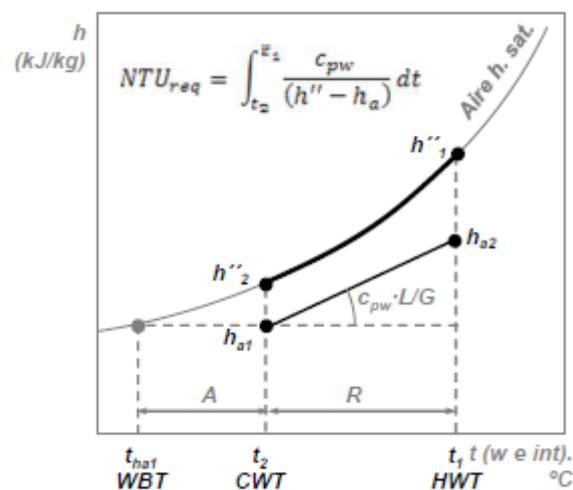


Figura 5.4.- Diagrama h-t del proceso de enfriamiento del agua en una torre de refrigeración

En este diagrama, se observa que:

- La entalpía de la interfase, h'' , evoluciona sobre la curva de aire húmedo saturado desde **HWT** hasta **CWT**.
- La entalpía del aire a la entrada es la misma que la del aire saturado correspondiente a **WBT**

La entalpía del aire se deduce de:

$$L \cdot c_{pw} \cdot dt = G \cdot dh_a \rightarrow \frac{dh_a}{dt} = c_{pw} \cdot \frac{L}{G} \quad (5.16)$$

5.1.3.- Curva de demanda del proceso

Tal y como se había definido anteriormente, el parámetro NTU_{req} depende de **HWT**, **CWT**, **WBT** y **L/G**. Los tres primeros vienen dados de la especificación de la demanda y de las condiciones climáticas, mientras que **L/G** es la variable de operación de la torre.

De forma equivalente, la demanda puede ser definida por los parámetros **R**, **A** y **WBT**, es decir, el “rango” (**HWT-CWT**) y la “aproximación” (**CWT-WBT**). Dado un conjunto de valores para cada parámetro, se puede conseguir un punto del diagrama **NTU** frente a **L/G**. Si se repite el proceso para diferentes valores de **L/G** se obtiene la curva de demanda para los **WBT**, **A** y **R** especificados. Además, se desprende de ello que, al fijar los demás parámetros, cuanto menor sea el aire introducido, mayor será la dificultad tendrá el proceso, dando lugar a una curva de demanda creciente con el parámetro **L/G**.

Repitiendo el proceso para diferentes valores de aproximación ($A_1 < A_2 < A_3$), se obtiene la familia de curvas de demanda para los **WBT** y **R** especificados. Como se puede observar en la Figura 5.5, cuanto mayor aproximación a la **WBT**, mayor es la dificultad del proceso, es decir, mayor es el **NTU** requerido.

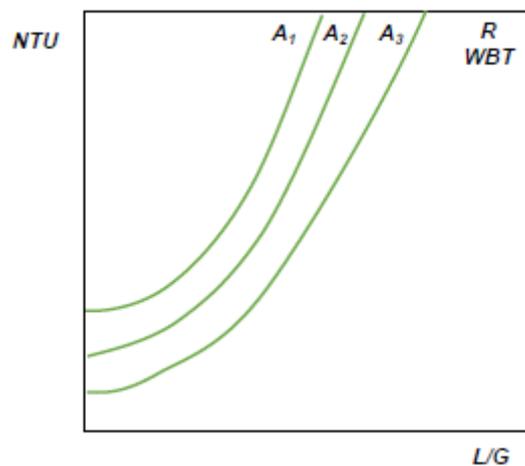


Figura 5.5.-Representación de la curva de demanda del proceso

5.1.4.- Curva característica de la torre

La curva característica de la torre depende principalmente de L/G y en menor medida de la velocidad del aire, y no se ve afectado por WBT , ni R , ni A .

Despreciando los efectos poco relevantes de la velocidad del aire, la curva característica de una torre suele aproximarse de la siguiente forma:

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = C \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{-n} \quad (5.17)$$

Donde C y n son parámetros adimensionales característicos de la torre que dependen principalmente del tipo de relleno.

5.2.- DATOS DE MEDICIÓN EN CAMPO

Con el objetivo de parametrizar el funcionamiento del relleno empleado en la torre se hace necesario tomar una serie de datos de medición a pie de campo que permitan predecir los diferentes puntos de operación de la instalación.

Teóricamente lo mejor sería evaluar la evolución de la entalpía tanto del agua como del aire según avanza a través del relleno de la torre. Sin embargo, en la práctica es inviable.

El funcionamiento de la torre depende principalmente de las condiciones de entrada y salida tanto del agua como del aire. Esto quiere decir que conociendo estos parámetros se podrá definir el comportamiento de esta.

La temperatura de entrada del agua es una variable de demanda que se puede obtener utilizando sensores de temperatura. De la misma forma, se consigue saber la temperatura de salida del agua.

Asimismo, la temperatura de salida del aire se puede obtener también de la misma manera. Además, tal y como se puede comprobar durante el funcionamiento normal de una torre, se puede suponer que el aire sale de la torre con una humedad relativa del 100%.

Por tanto, se toman mediciones en una torre con un relleno del mismo tipo que el utilizado en este proyecto, pero de 1,8 metros de altura, mostrándose los resultados en la Tabla 5.1:

Medida	HWT (°C)	CWT (°C)	WBT (°C)	T_{aire, sal} (°C)	H.R._{aire, sal} (%)
1	49	29	22	38	100
2	44	32	20	39	100
3	33	19	16	23	100
4	33	23	18	27	100

Tabla 5.1.- Mediciones realizadas en campo en una torre con un relleno del mismo tipo

5.3.- ESTUDIO DE DATOS CLIMÁTICOS

Los datos climáticos de la zona de construcción son vitales para realizar un estudio completo de las torres de refrigeración y repercuten de manera muy significativa tanto a nivel económico como a nivel de rendimiento del sistema.

Por tanto, el propósito de este estudio será obtener la temperatura del bulbo húmedo en la planta donde se desea proyectar el equipo. A su vez, si se logra saber dicha magnitud, se puede conocer también su entalpía, magnitud fundamental para obtener la curva de funcionamiento de la torre.

En este tipo de proyectos se suele emplear el valor percentil estacional referido al 95%. Esto significa que solo se supera en un 5% de las veces en la estación del año más desfavorable según el tipo de proyecto, que, en este caso, sería el verano.

Para conseguir los datos de las condiciones geográficas y climáticas exteriores del proyecto, se dispone en España de la guía IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía).

La guía facilita varios datos relativos a las condiciones de diseño de equipos, tanto para calefacción como para refrigeración. En este caso, se puede obtener la temperatura seca y húmeda para los percentiles anuales habituales (99,6%,99% y 98%) y la oscilación media diaria.

NPA	NPE
99,6%	99%
99%	97,5%
98%	95%

Tabla 5.2.-Relación entre nivel percentil anual (NPA) y nivel percentil estacional (NPE)

La estación meteorológica más cercana al emplazamiento donde se sitúa la planta es la del Aeropuerto de Ranón. El valor que proporciona la guía para dicha estación con un valor percentil estacional del 95% es de $WBT=19,5^{\circ}C$.

Cabe destacar que los datos que aparecen en la guía no están actualizados desde el año 2007, por lo que puede haberse producido alguna variación en la actualidad. Como consecuencia, tomamos una temperatura de bulbo húmedo ligeramente mayor, $WBT=20^{\circ}C$, para cumplir con las condiciones de funcionamiento de la torre de refrigeración, por muy adversa que sea la estación del año más desfavorable.

5.4.- CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL RELLENO DE LA TORRE

Como se ha explicado anteriormente, se va a dimensionar una torre de refrigeración de tiro inducido, con flujo a contracorriente y con relleno de goteo. La

curva característica de la torre se obtiene a partir de las mediciones realizadas en campo en una torre con un relleno del mismo tipo de 1,8 metros de altura, y que se había recogido anteriormente en la Tabla 5.1

Para ello se han de obtener las constantes de la ecuación característica de la torre, **C** y **n**:

$$NTU = C \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{-n} \quad (5.18)$$

En primer lugar, se deben calcular los valores de NTU y de L/G para cada una de las medidas recogidas en la Tabla 5.1. Se calcula la variación de la entalpía del agua en cada una de ellas utilizando la siguiente equivalencia:

$$\Delta h_{\text{agua}} = c_p \cdot (HWT - CWT) \quad (5.19)$$

Donde **c_p** es el calor específico del agua $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right)$

A continuación, utilizando las tablas de propiedades termodinámicas del aire húmedo a presión atmosférica (ASHRAE, Fundamentals 2001), se obtienen las distintas entalpías de entrada del aire en la torre (**h_{aire ent}**). De la misma forma, sabiendo que a la salida el aire va a estar saturado (H.R del aire=100%), y, buscando en las tablas correspondientes, se consiguen saber las entalpías del aire a la salida (**h_{aire sal}**).

Una vez se tienen los valores de las entalpías en ambos casos, se calcula la variación de entalpía del aire en la torre de refrigeración, tal y como se puede observar:

$$\Delta h_{\text{aire}} = h_{\text{aire sal}} - h_{\text{aire ent}} \quad (5.20)$$

El siguiente paso consiste en obtener la aproximación (**A**) y el rango (**R**) para cada una de las medidas. Además, se calcula la relación L/G correspondiente, teniendo en cuenta que, según la ecuación 5.16:

$$\frac{L}{G} = \frac{\Delta h_{\text{aire}}}{\Delta h_{\text{agua}}} \quad (5.4)$$

En la siguiente tabla se recogen los resultados de los cálculos realizados:

Medida	1	2	3	4
HWT(°C)	49	44	33	33
CWT(°C)	29	32	19	23
WBT (°C)	22	20	16	18
T _{aire,sal} (°C)	38	39	23	27
H. R _{aire,sal} (%)	100	100	100	100
$\Delta h_{\text{agua}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	83,6	50,16	58,52	41,8
$h_{\text{aire,ent}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	64,66	57,555	44,963	51,008
$h_{\text{aire,sal}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	150,713	158,504	68,44	85,285
$\Delta h_{\text{aire}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	86,053	100,949	23,477	34,277
A (°C)	7	12	3	5
R (°C)	20	12	14	10
L/G(-)	1,03	2,01	0,40	0,82

Tabla 5.3.- Resultados de los parámetros en función de las medidas recogidas

Una vez obtenidos **WBT**, **A**, **R** y **L/G**, se procede a utilizar el diagrama (**h-t**) del proceso para calcular el NTU. Utilizando la teoría recogida en el apartado 5.1.2 , se logra integrar numéricamente la ecuación de Merkel, mediante la regla del trapecio a intervalos de 0,5°C, obteniendo el NTU equivalente para cada uno de

ellos y, haciendo un sumatorio, para obtener el NTU correspondiente a una temperatura determinada, tal y como se puede observar con el siguiente ejemplo:

t_w (°C)	h'' (kJ/kg)	h_a (kJ/kg)	$h'' - h_a$ (kJ/kg)	$\frac{1}{h'' - h_a}$ (kJ/kg)	Δ_{tw} (°C)	$NTU = \frac{c_{pw} \cdot \Delta_{tw}}{(h'' - h_a)_{avg}}$	ΣNTU	R (°C)
32,0	111,0	57,6	53,42	0,0187				
32,5	113,9	61,76	52,16	0,0192	0,5	0,0396	0,0396	0,5
33,0	116,9	65,96	50,90	0,0196	0,5	0,0406	0,0802	1
33,5	119,9	70,16	49,78	0,0201	0,5	0,0415	0,1217	1,5
34,0	123,0	74,36	48,65	0,0206	0,5	0,0425	0,1642	2

Tabla 5.4.-Ejemplo de cálculo de NTU utilizando la regla de trapecios

Por tanto, en función de los valores de **WBT**, **A**, **R** y **L/G**, se obtiene el NTU correspondiente a cada medida, tal y como se muestra en la Tabla 5.5:

Medida	L/G	NTU
1	1,03	1,6983
2	2,01	1,1205
3	0,40	2,8273
4	0,82	1,8967

Tabla 5.5.-Cálculo del NTU en función de cada medida

Por último, conociendo los parámetros **L/G** y **NTU** para cada medición, se lleva a cabo una regresión lineal con el fin de obtener las constantes **C** y **n** que definían la ecuación característica de la torre (para una altura de relleno de 1,8 m):

$$NTU = 1,692 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{-0,572} \quad (5.22)$$

Sin embargo, lo que realmente interesa conocer es el valor de la constante C por metro de altura, debido a que se encuentran relacionadas entre sí. Para ello, se realiza una conversión de la ecuación (5.22), sabiendo que:

$$C' \cdot H = C \cdot H' \quad (5.23)$$

Siendo C' el valor de la constante para una altura (H') determinada y C el valor de la constante para la altura de $H=1,8$ metros

5.5.- DIMENSIONADO DEL RELLENO DE LA TORRE

En primer lugar, se toman unos datos de partida fijados en función de las características del proceso al que dará servicio la torre que se desea dimensionar:

Datos partida		
Caudal de agua a enfriar $\left(\frac{m^3}{h}\right)$	\dot{V}_w	2100
Temperatura de salida del condensador (°C)	HWT	48
Temperatura de entrada del condensador (°C)	CWT	32
Temperatura de bulbo húmedo (°C)	WBT	20
Rango (°C)	R	16
Aproximación (°C)	A	12

Tabla 5.6.-Datos de partida seleccionados

La meta es conseguir el diseño más económico atendiendo tanto a los parámetros estructurales, siendo el más importante la altura de relleno que se quiere utilizar; como a el coste eléctrico, producido por la acción del ventilador y de las bombas de impulsión del agua.

Para ello, se plantean diferentes soluciones en función de la altura de relleno, que va a definir el punto de trabajo de la torre de refrigeración en la gráfica (NTU–L/G), la cual a su vez depende de WBT, R y A. Además, el punto de trabajo de la torre depende de L/G, que influye en el coste de operación de la torre, por lo que también se debe tomar en consideración.

La elección del valor de L/G suele estar condicionada por consideraciones económicas entre coste inicial (relleno) y coste de explotación (electricidad del ventilador).

- L/G↑ coste inicial mayor, menor coste de explotación
- L/G↓ coste inicial menor, mayor coste de explotación

En la mayoría de las torres de convección forzada en servicio el valor de L/G está comprendido entre 1 y 3.

Tomando como referencia dichos condicionantes, se elige un rango de alturas entre 1 y 6 metros para el relleno. Utilizando como referencia la ecuación característica de la torre para una altura de H=1,8 metros, se calculan las nuevas constantes para cada altura correspondiente y se eligen dos puntos para representar dichas ecuaciones características sobre la curva de demanda y obtener el punto de trabajo (L/G, NTU) en cada caso.

CURVA DISPONIBLE									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Nombre	H ₁	H _{1,5}	H ₂	H _{2,5}	H ₃	H _{3,5}	H ₄	H ₅	H ₆
Pto.2 (L/G=0,1)	3,49	5,23	6,98	8,72	10,46	12,21	13,95	17,44	20,93
Pto.1 (L/G=5)	0,38	0,56	0,75	0,94	1,13	1,31	1,50	1,88	2,25

Tabla 5.7.-Rango de alturas de relleno elegidas

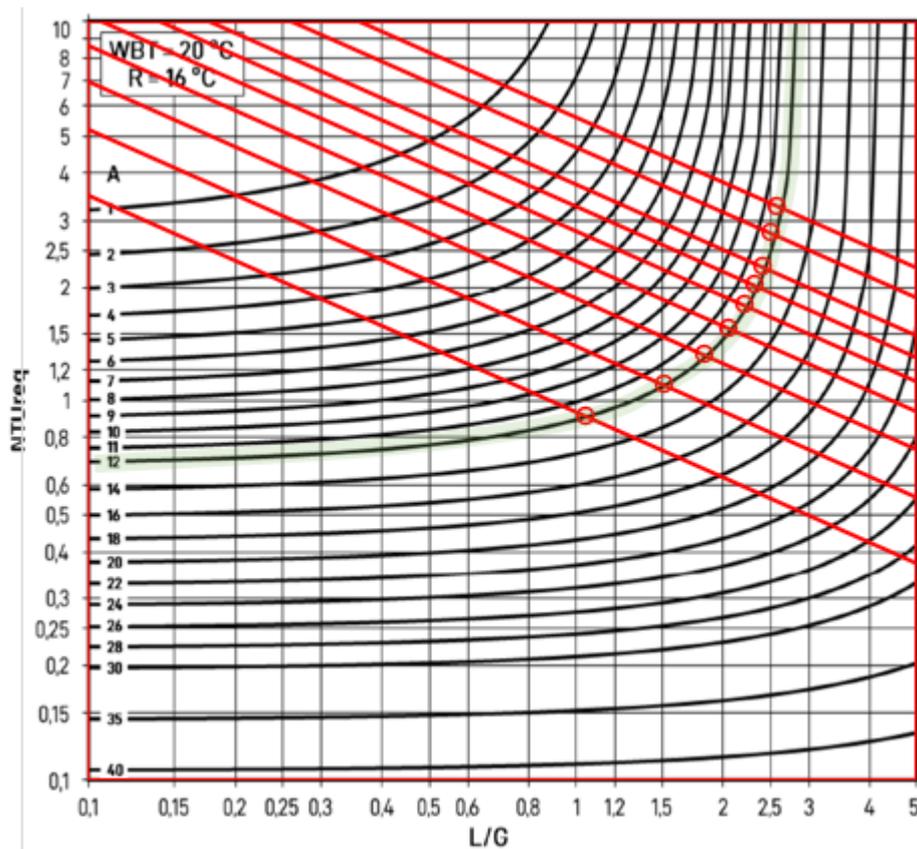


Figura 5.6.-Curva de demanda del proceso

Tal y como se puede observar, la ecuación característica correspondiente a cada altura de relleno se corta con la curva de demanda del proceso. En dichos puntos de intersección, se encuentran los valores de L/G y NTU , los cuales, utilizando la integral de Merkel, se determinan con una mayor exactitud, quedando reflejados los resultados en la siguiente tabla:

RESULTADOS INTERSECCIÓN									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
L/G	1,06	1,54	1,87	2,09	2,25	2,36	2,45	2,56	2,64
NTU_{req}	0,91	1,10	1,32	1,54	1,78	2,01	2,25	2,74	3,24
NTU_{ava}	0,91	1,10	1,32	1,54	1,78	2,01	2,25	2,74	3,24

Tabla 5.8.-Resultados Intersección

Una vez obtenidas las magnitudes anteriores, se procede a calcular la superficie total en planta de la torre de refrigeración, la cual viene determinada por la longitud del lado de cada celda y el número de estas:

$$S_{\text{Total}} = l^2 \cdot N_{\text{celdas}} \quad (5.24)$$

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el área de la torre está relacionada tanto con la carga de agua (L) como con la de aire (G):

$$L = \frac{\dot{V}_w \cdot 1000}{s} \quad (5.25)$$

$$G = \frac{\dot{m}_a}{s} \quad (5.26)$$

Además, existen unos márgenes de seguridad tanto para la carga de agua $\left(L \leq 15000 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}\right)$ como para la carga de aire $\left(G \leq 9000 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}\right)$ por encima de los cuales se podría ocasionar una posible inundación del relleno o una velocidad de aire excesiva, respectivamente. Por lo tanto, se deberá elegir la superficie total de la instalación calculando la L y G correspondiente en cada caso y comprobando que se encuentra dentro del margen de seguridad.

Los resultados del estudio quedan resumidos en la siguiente tabla:

RESULTADOS SUPERFICIE TOTAL									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
l (m)	7,5	7,5	7	7	7	7	7	7	7
N _{cel}	4	3	3	3	3	3	3	3	3
S _{tot} (m ²)	225	169	147	147	147	147	147	147	147
L ($\frac{kg}{h \cdot m^2}$)	9333	12444	14285	14285	14285	14285	14285	14285	14285
G ($\frac{kg}{h \cdot m^2}$)	8805	8107	7659	6851	6354	6050	5835	5571	5417

Tabla 5.9.-Cálculo del área de la torre de refrigeración

A su vez, con los valores obtenidos, se puede calcular el caudal de aire (\dot{m}_a) ($\frac{kg}{s}$) que va a pasar a través de la torre de refrigeración, reflejado en la Tabla 5.10:

CAUDAL DE AIRE									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
m _a ($\frac{kg}{s}$)	550	380	313	280	259	247	238	228	221

Tabla 5.10.-Valores del caudal del aire en función de la altura de relleno

5.6.- PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA TORRE

La siguiente etapa consiste en obtener las dimensiones de cada una de las partes que componen la torre de refrigeración, en función del número de celdas, la altura y lado de relleno y la relación L/G.

Independientemente de las condiciones anteriores, habrá una serie de parámetros de diseño que no van a variar para las distintas soluciones analizadas, quedando reflejadas en la siguiente tabla:

Simb.	PARÁMETROS	
	DEMANDA	
\dot{V}_w	Caudal de agua $\left(\frac{m^3}{h}\right)$	2100
t_{ac}	Tiempo de acumulación de agua (min)	5
	OPERACIÓN	
h_p	Altura plenum (m)	2
h_c	Altura de canales (m)	0,5
h_{rc}	Altura de relleno a canales (m)	0,5
h_{vr}	Altura de ventana a relleno (m)	0,5
s_c	Separación canales de distribución (m)	0,7
a_c	Anchura de canales (m)	0,2
sh_l	Separación horizontal listones (m)	0,2
sv_l	Separación vertical listones (m)	0,2
s_s	Separación láminas separador de gotas (m)	0,1
l_r	Longitud de rellanos (m)	1
h_d	Altura del difusor (m)	1,5
N_b	Número de bombas (-)	2

ESTRUCTURALES		
e_{lc}	Espesor losa cimentación (m)	0,4
e	Espesor cerramiento (m)	0,3
e_c	Espesor cubierta (m)	0,24
e_d	Espesor difusor (m)	0,1
s_v	Separación de viguetas de apoyo de canales (m)	2,0
s_m	Separación mallas de apoyo del relleno (m)	1,2
P_{ee}	Peso estructura escalera por m altura $\left(\frac{kg}{m}\right)$	321
P_{be}	Peso barandilla por m altura $\left(\frac{kg}{m}\right)$	84,5
N_{pe}	Número de peldaños por m altura $\left(\frac{ud}{m}\right)$	4,5
N_{re}	Superficie de rellanos por m altura $\left(\frac{m^2}{m}\right)$	1

Tabla 5.11.-Valores considerados para la torre de refrigeración

Tomando como referencia los parámetros anteriores, se puede hallar la geometría resultante de la torre de refrigeración, tomando una serie de criterios de diseño habituales.

Las ventanas situadas en la parte inferior de la instalación, y por donde el aire entrará hacia el interior, se establecen con una dimensión de un cuarto del lado del relleno (**I**).

Por otro lado, para conseguir lograr las dimensiones de la balsa de agua, se toman las siguientes consideraciones.

El volumen interior se calcula como la relación entre el caudal y el tiempo de acumulación del agua:

$$V_b = \frac{\dot{V}_w \cdot t_a}{60} \quad (m^3) \quad (5.27)$$

Y la altura de la balsa se plantea como una relación entre el volumen interior, el número de celdas (N) y el lado del relleno (l):

$$h_b = \frac{V_b}{(N \cdot l^2)} \quad (\text{m}) \quad (5.28)$$

La altura de los cerramientos verticales ciegos (h_{cvc}) será la equivalente a la total de la torre a excepción de la cubierta superior y del difusor:

$$h_{cvc} = h_b + h_v + H + h_p + h_c + h_{rc} + h_{vr} \quad (\text{m}) \quad (5.29)$$

En relación con lo anterior, se halla el número de cerramientos verticales con ventana, siendo dos veces el número de celdas que tenga el sistema. Respecto a la altura de cerramiento a construir, esta debe de ser la misma de la de los verticales ciegos excluyendo la altura de las ventanas ($h_{cvc} - h_v$) (m).

Posteriormente, se efectúa el cálculo tanto de la longitud exterior de la torre (l_e) como del ancho exterior (a_e), relacionando la longitud del relleno, con el número de celdas y el espesor del cerramiento:

$$l_e = N \cdot l + (N + 1) \cdot e \quad (\text{m}) \quad (5.30)$$

$$a_e = l + 2 \cdot e \quad (\text{m}) \quad (5.31)$$

Por otro lado, se halla la cota de la cubierta (Z_c), que es la suma de la altura de los cerramientos verticales ciegos más el espesor de la cubierta ($h_{cvc} + e_c$) (m).

El siguiente paso consiste en calcular el número de viguetas de apoyo a los canales (n_{vc}) que se van a necesitar, siendo una relación entre el número de celdas, el lado del relleno y la separación de viguetas de apoyo de canales:

$$n_{vc} = \frac{N-l}{s_v} \quad (5.32)$$

En relación con lo anterior, también se han de calcular el número de viguetas de apoyo al tabique distribuidor, siendo dos veces el número de celdas que contenga la torre.

En cuanto a la longitud de las viguetas de apoyo (l_v), tanto las que soportan los canales como a las del apoyo del tabique distribuidor, tendrán la misma medida que el ancho exterior de la torre ($l_v = a_e$) (m) .

El número (n_c) y longitud de los canales (l_c), está relacionado con el lado del relleno, el número de celdas, la separación de los canales de distribución y el espesor de cerramiento:

$$n_c = \frac{N-l}{s_c} \quad (5.33)$$

$$l_c = l + e \text{ (m)} \quad (5.34)$$

Además, se determina los tramos de listones que se van a necesitar por celda (n_l), dividiendo el lado del relleno entre la separación mallas de apoyo del relleno:

$$n_l = \frac{l}{s_m} \text{ (ud)} \quad (5.35)$$

Por último, se necesita saber la altura de bombeo del agua (h_{ba}), que va a tener que alcanzar las bombas de agua, para posteriormente poder elegir un modelo adecuado. Se obtendría de la siguiente manera:

$$h_{ba} = h_b + h_v + H + h_c + h_{rc} + h_{vr} \text{ (m)} \quad (5.36)$$

Una vez obtenidos los parámetros geométricos de la torre, se procede a estimar las mediciones de cada partida del presupuesto.

5.6.1.- Acondicionado del terreno

Consiste en realizar una excavación a cielo abierto de la superficie dónde posteriormente se situarán la losa de cimentación de la torre de refrigeración.

Su magnitud dependerá tanto de la longitud (l_e) como el ancho exterior de la torre (a_e), además de la profundidad que queremos lograr, dependiendo del espesor de la losa de cimentación (e_{lc}), añadiendo 10 cm extra para el hormigón de limpieza.

$$\text{Excavación a cielo abierto} = l_e \cdot a_e \cdot (e_{lc} + 0.1) \text{ (m}^3\text{)} \quad (5.37)$$

5.6.2.- Cimentaciones

Se trata del proceso de construcción de la base sobre la que se asentará la torre de refrigeración. Se creará por tanto una placa de cimentación, cuyo volumen dependerá de su espesor (e_{lc}) y de la longitud y ancho exterior.

$$\text{Placa cimentación} = l_e \cdot a_e \cdot e_{lc} \text{ (m}^3\text{)} \quad (5.38)$$

Además, para una mejor ejecución del hormigón armado, se realizará un encofrado a lo largo de todo el perímetro, el cual se relaciona igualmente con las tres variables anteriores.

$$\text{Encofrado placa cimentación} = (l_e + a_e) \cdot e_{lc} \cdot 2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (5.39)$$

5.6.3.- Estructura de hormigón y fábrica

En esta fase se alcanza la forma y dimensiones proyectadas de la torre de refrigeración. En primer lugar, se calcula el volumen de los cerramientos verticales de acuerdo con:

$$\text{Cerramientos Verticales} = n_{cvc} \cdot h_{cvc} \cdot a_e \cdot e + n_{cvv} \cdot l \cdot h_{cvv} \cdot e \quad (\text{m}^3) \quad (5.40)$$

A continuación, se determina el volumen de la placa de cubierta, mediante la siguiente relación:

$$\text{Placa de cubierta} = a_e \cdot l_e - N \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_v}{2}\right)^2 \quad (\text{m}^2) \quad (5.41)$$

Siendo (D_v) el diámetro del ventilador a elegir.

Después, se calcula la superficie de placa de hormigón armado necesaria para construir el canal colector, de la siguiente manera:

$$\text{Canal colector} = l_e \cdot (0,5 + h_c + h_{rc}) \quad (\text{m}^2) \quad (5.42)$$

Una vez realizada la cubierta, se determina el volumen de hormigón armado que va a ser necesario para crear el difusor, siendo de la siguiente forma:

$$\text{Difusor} = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_v}{2}\right) + \left(\frac{D_d}{2}\right)\right] \cdot \left[\left(\left(\frac{D_v}{2}\right) - \left(\frac{D_d}{2}\right)\right)^2 + h_d^2\right]^{0,5} \cdot e_d \quad (\text{m}^3) \quad (5.43)$$

Siendo (D_d) el diámetro mayor del difusor, el cual se estima medio metro mayor que el diámetro del ventilador (D_v).

Por otro lado, en el interior de la torre se calcula la longitud de vigueta prefabricada que se necesita instalar:

$$\text{Vigueta pref.} = (n_{vc} + n_{vt}) \cdot l_v \quad (\text{m}) \quad (5.44)$$

De la misma forma, se halla la superficie del distribuidor de aire ejecutado mediante tabique palomero:

$$\text{Tabique palomero} = N \cdot l \cdot (h_v + h_{vr}) \quad (\text{m}^2) \quad (5.45)$$

Por último, se calculan el número de anclajes estructurales que tendrá la instalación, estimando que debe haber 100 anclajes por celda, aproximadamente.

5.6.4.- Estructura metálica

Se trata de todo aquello relacionado con la instalación de la escalera exterior que facilitará el acceso al interior de la torre de refrigeración. Se calcula en función del peso cada parte que la compone:

- Estructura escalera = $h_{cvc} \cdot P_{ee}$ (kg) (5.46)

- Estructura barandilla = $h_{cvc} \cdot P_{be}$ (kg) (5.47)

- Pavimento rejilla rellanos = $h_{cvc} \cdot N_{re}$ (kg) (5.48)

- Peldaños rejilla = $h_{cvc} \cdot N_{pe}$ (kg) (5.49)

5.6.5.- Distribución del agua

En este apartado se detalla la medición de cada uno de los elementos por los cuales va a fluir el agua a enfriar del sistema.

Primero se calcula el canal de chapa galvanizada, cuya medición se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\text{Canal chapa} = n_c \cdot (l_c \cdot (a_c + 2 \cdot h_c)) \quad (\text{m}^2) \quad (5.50)$$

La malla necesaria para ejecutar el soporte de los listones que constituyen el relleno se determina de acuerdo con:

$$\text{Malla soporte} = N \cdot H \cdot l \cdot (n_l + 1) \quad (\text{m}^2) \quad (5.51)$$

Posteriormente, se halla la longitud total de listones que van a ser necesarios en la instalación:

$$\text{Listones} = N \cdot \frac{H}{s_{v1}} \cdot \frac{l}{s_{h1}} \cdot l \quad (\text{m}) \quad (5.52)$$

Por último, se determina el número de boquillas y platos difusores que van a ser utilizados, siguiendo la relación de a continuación:

$$\text{Boquillas y Platos difusores} = N \cdot \left(\frac{1}{s_c}\right)^2 \quad (\text{ud}) \quad (5.53)$$

5.6.6.- Ventilación y bombeo

En este apartado se explica detalladamente el modo de cálculo de la superficie de separador de gotas, además del número de unidades del equipo mecánico que se va a utilizar para el funcionamiento de la torre de refrigeración.

En primer lugar, se realiza toda la medición correspondiente al separador de gotas, planteando la siguiente relación:

$$\text{Separador de gotas} = h_c \cdot l \cdot \left(\frac{(N-1-n_c \cdot a_c)}{s_s} - 1 \right) \quad (\text{m}^2) \quad (5.54)$$

Por otra parte, se efectúa un análisis del equipo mecánico que se va a emplear. Anteriormente se había fijado el número de bombas a usar, siendo dos en total. El resto de los elementos, compuestos por los ventiladores de aire junto con sus motores, reductores y ejes de transmisión correspondientes, serían los equivalentes al número de celdas que tuviese la torre de refrigeración diseñada.

Una vez calculadas las medidas de cada parámetro que define la instalación, en función de cada una de las alturas de relleno que se están analizando, se realiza un estudio acerca del precio por unidad de medición de cada elemento. Se consulta a diferentes proveedores especializados en este tipo de suministros para la obtención del coste unitario de materiales y equipos. Los resultados obtenidos se encuentran recogidos en la Tabla 5.12. Cabe señalar que estará incluido tanto el coste del material y transporte, como la mano de obra y un porcentaje de un 2% de los costes directos complementarios.

MEDICIONES	PRECIOS (€)
ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO	
Excavación a cielo abierto (m ³)	20,23
CIMENTACIONES	
Placa de cimentación (m ³)	239,99
Encofrado (m ²)	22,21
ESTRUCTURA DE HORMIGÓN Y FÁBRICA	
Cerramientos verticales (m ³)	341,07
Placa de cubierta (m ²)	115,17
Canal colector (m ²)	115,17
Difusor (m ³)	341,07
Vigueta prefabricada (m)	10,94
Tabique palomero (m ²)	29,01
Anclajes estructurales (ud)	8,09
ESTRUCTURA METÁLICA	
Estructura escalera (kg)	9,56
Estructura barandilla (kg)	13,01
Pavimento rejilla rellanos (m ²)	63,26
Peldaños rejilla (ud)	41,01
DISTRIBUCIÓN DE AGUA	
Canal de chapa galvanizada (m ²)	30,24
Malla de soporte (m ²)	8,09
Listones (m)	8,06
Boquillas y platos difusores (ud)	6,51
VENTILACIÓN Y BOMBEO	
Separador de gotas (m ²)	24,87
Reductor para equipo mecánico (ud)	1639,17
Eje de transmisión equipo ventilación (ud)	420,56

Tabla 5.12.-Precios correspondientes a cada medición

Como se puede observar en la tabla anterior, falta por señalar tanto el precio de la bomba de impulsión de agua como del ventilador (y de su motor), puesto que varían en función del dimensionado de la torre.

- **Bomba de impulsión de agua**

Se considera la instalación de dos bombas, cada una de ellas impulsando la mitad del caudal de agua, debido a que la potencia necesaria de arranque es menor y en caso de avería de una de ellas, la torre puede seguir funcionando. Por tanto, en función del caudal del agua y de la altura de bombeo, se elige un modelo de bomba a partir del catálogo de Grundfos y escogiendo la más económica en términos de coste inicial y de ciclo de vida (15 años). Los resultados del estudio se encuentran en la Tabla 5.13, junto con su coste final incluyendo la mano de obra y costes directos complementarios.

Altura Relleno (m)	Altura Bombeo (m)	Modelo	Precio bomba (€)	Precio Bomba + Mano de obra (€)
1	5,5	NBG 350-300-305/283	34.508	35.365,43
1,5	6	NBG 350-300-305/287	41.247	42.239,21
2	6,5	NBG 350-300-305/294	41.247	42.239,21
2,5	7	NBG 350-300-305/304	41.247	42.239,21
3	7,5	NBG 350-300-305/313	41.247	42.239,21
3,5	8	NBG 350-300-305/319	43.500	44.537,27
4	8,5	NBG 350-300-305/326	43.500	44.537,27
5	9,5	NBG 350-300-305/339	43.500	44.537,27
6	10,5	NBG 350-300-305/350	43.500	44.537,27

Tabla 5.13.-Selección bomba de impulsión de agua

Además, se ha analizado la potencia que necesita el conjunto bomba-motor para funcionar, debido a que influye en el coste eléctrico, quedando recogidos los datos en la siguiente tabla:

Altura Relleno (m)	Altura Bombeo (m)	Modelo	Potencia Requerida Bomba (kW)
1	5,5	NBG 350-300-305/283	22,24
1,5	6	NBG 350-300-305/287	24,29
2	6,5	NBG 350-300-305/294	26,46
2,5	7	NBG 350-300-305/304	27,67
3	7,5	NBG 350-300-305/313	29,04
3,5	8	NBG 350-300-305/319	30,63
4	8,5	NBG 350-300-305/326	32,04
5	9,5	NBG 350-300-305/339	35,06
6	10,5	NBG 350-300-305/350	39,06

Tabla 5.14.-Potencia requerida de cada bomba

- **Ventilador**

Para la elección del ventilador se utilizan como parámetro el caudal del aire, considerándose una temperatura del aire de 50 °C, una densidad de aire de $1,05 \frac{kg}{m^3}$ y una presión estática de 125 Pa. Empleando el programa de selección del fabricante Howden, se obtienen los siguientes ventiladores, en función de los distintos caudales de aire:

Altura Relleno (m)	Caudal de aire (m_a) ($\frac{kg}{s}$)	Modelo	Precio ventilador (€)	Precio ventilador + mano de obra (€)
1	550	A	4275	4555,2
1,5	380	B	4133	4410,4
2	313	B	4133	4410,4
2,5	280	C	2533	2778,4
3	259	C	2533	2778,4
3,5	247	C	2533	2778,4
4	238	C	2533	2778,4
5	228	C	2533	2778,4
6	221	C	2533	2778,4

Tabla 5.15.-Ventiladores seleccionados en función de cada caudal del aire

Además, se ha analizado la potencia que requiere el ventilador, puesto que es el parámetro que se va a utilizar a la hora de elegir un motor que suministre dicha potencia, tal como se puede observar en la Tabla 5.16:

Altura Relleno (m)	Caudal de aire (m_a) ($\frac{kg}{s}$)	Modelo	Pot. eje de cada ventilador (kW)
1	550	A	40,25
1,5	380	B	45,00
2	313	B	24,53
2,5	280	C	21,57
3	259	C	18,53
3,5	247	C	16,93
4	238	C	15,90
5	228	C	14,80
6	221	C	14,13

Tabla 5.16.-Potencia requerida de cada ventilador

Por otra parte, en la Tabla 5.17. se detallan las medidas de los diámetros de cada modelo de ventilador (D_a), que son empleados para hallar el diámetro mayor del difusor (D_d), así como para calcular el volumen de hormigón armado que va a ser necesario para crear el difusor, tal como se había explicado en el punto 5.6.3.-.

Modelo	Diámetro Ventilador (m)	Diámetro mayor Difusor (m)
A	6,096	6,5
B	4,95	5,5
C	4,455	5

Tabla 5.17.-Dimensiones correspondientes a cada modelo de ventilador

- **Motor para ventilador de aire**

Tal y como se ha explicado anteriormente, se eligen motores que aporten la potencia que requieren los ventiladores. Los resultados del estudio se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

Modelo	Pot. eje de cada Vent	Precio Motor (€)	Precio Motor + mano de obra (€)	Modelo
A	40,25	1674,01	1816,66	Motor 45 KW (60 CV) 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
B	45	2291,98	2446,99	Motor 55 KW 75 CV 3000 RPM IE3 de Fundición CEMER
B	24,53	1479,08	1617,83	Motor 30 KW (40 CV) 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	21,57	1479,08	1617,83	Motor 30 KW (40 CV) 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	18,53	1212,27	1345,69	Motor 22 KW (30 CV) 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	16,93	861,63	988,03	Motor 18,5 KW 25 CV 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	15,90	861,63	988,03	Motor 18,5 KW 25 CV 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	14,80	861,63	988,03	Motor 18,5 KW 25 CV 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER
C	14,13	861,63	988,03	Motor 18,5 KW 25 CV 3000 RPM Trifásico IE3 de Fundición CEMER

Tabla 5.18.-Motores seleccionados en función de la potencia de los ventiladores

Cabe señalar que, al igual que en las bombas, la potencia consumida por estos motores determinará el coste eléctrico, tal y como se explicará posteriormente.

6. Estudio económico

6.1.- CÁLCULO DEL COSTE TOTAL

Una vez realizado el estudio técnico, donde se definían las mediciones y costes de cada elemento que componía la construcción de la torre de refrigeración, a continuación, se van a calcular tanto el coste de implantación de la instalación (CAPEX, capital expenditure) como los costes eléctricos en un periodo de 15 años (OPEX, operational expenditures), en función del rango de alturas de relleno que se había definido anteriormente, con el objetivo de determinar la torre más económica.

Cabe destacar que la suma de los precios de la Tabla 5.12 correspondería al total de los costes directos. Sin embargo, habría una serie de gastos generales que se han de añadir a los costes directos, siendo la suma de ambos el total del coste de la construcción sin impuestos.

GASTOS GENERALES	
Costes indirectos de presupuesto (%)	3
Costes indirectos de venta (%)	3
Costes indirectos de estudio (%)	3
Gastos generales (%)	14
Beneficio industrial (%)	5

Tabla 6.1.- Gastos Generales

Por último, habría que añadir el IVA (21%) para obtener el coste total o presupuesto de la torre. Una vez elaborado el presupuesto para cada una de las alturas de relleno elegidas, se comparan los resultados en la siguiente tabla:

PRESUPUESTO TORRE									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Presupuesto Torre (k€)	524	506	506	534	565	604	637	703	769

Tabla 6.2.-Presupuesto torre de refrigeración en función de la altura de relleno

Por otra parte, es necesario analizar el coste energético de la electricidad consumida por los motores del ventilador y de la bomba. Cabe destacar que el motor y la transmisión del ventilador tienen una serie de pérdidas, que deben de ser tenidas en cuenta. Por tanto, el consumo final es el cociente entre la potencia requerida del ventilador y la eficiencia del conjunto motor-transmisión, quedando resumido en la Tabla 6.3:

CONSUMO ENERGÉTICO VENTILADOR									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Potencia Requerida Ventilador (kW)	40,25	45	42,53	21,57	18,53	16,93	15,90	14,80	14,13
Eficiencia Motor-Transmisión (%)	91,43	93,93	92,83	92,83	92,20	91,93	91,93	91,93	91,93
Potencia Consumida Ventilador (kW)	44,02	47,91	26,43	23,23	20,10	18,42	17,30	16,10	15,37

Tabla 6.3.-Consumo energético del ventilador

La potencia consumida del ventilador y de la bomba queda recogida en la Tabla 6.4:

CONSUMO ENERGÉTICO									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Potencia Consumida Ventilador (kW)	44,02	47,91	26,43	23,23	20,10	18,42	17,30	16,10	15,37
Potencia Consumida Bomba (kW)	22,24	24,29	26,46	27,67	29,04	30,63	32,04	35,06	39,06

Tabla 6.4.- Resumen del consumo energético

Como se había señalado anteriormente, van a utilizarse dos bombas de impulsión. Además, debe haber un ventilador por celda. Por lo tanto, el consumo energético de las bombas sería el doble del mostrado en la tabla, y el de los ventiladores el mostrado multiplicado por el número de celdas que tuviese cada torre específica. En la Tabla 5.9 se indicaba el número de celdas que había en función de la altura de relleno.

Para la obtención del coste final, se ha considerado un precio medio de la electricidad de $0,1 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$ y que los motores van a estar funcionando las 24 horas del día durante los 365 días del año. En la Tabla 6.5 se encuentra el resumen del coste energético:

COSTE ENERGÉTICO TOTAL									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Pot Vents (kW)	176,08	143,73	79,29	69,69	60,3	55,26	51,9	48,3	46,11
Coste Ventilac. (k€)	2314	1889	1042	916	792	726	682	635	606
Pot Bombas (kW)	44,48	48,58	52,92	55,34	58,08	61,26	64,08	70,12	78,12
Coste Bombeo (k€)	584	638	695	727	763	805	842	921	1026
Coste Total (k€)	2898	2527	1737	1643	1556	1531	1524	1556	1632

Tabla 6.5.-Resumen del coste energético

6.2.- ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA

La suma del presupuesto de la torre y del coste energético determinan el coste total que tendría la construcción y uso de la torre de refrigeración durante 15 años y esto permite determinar la altura de relleno óptima. En la Tabla 6.6 queda resumido el coste total:

COSTE TOTAL									
H (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	5,00	6,00
Presupuesto Torre (k€)	524	506	506	534	565	604	637	703	769
Coste energético (k€)	2898	2527	1737	1643	1556	1531	1524	1556	1632
Coste Total (k€)	3423	3033	2244	2177	2121	2135	2161	2259	2401

Tabla 6.6.-Resumen del coste total

La Figura 6.1 muestra gráficamente los componentes principales del coste total de la torre (TCO, total cost ownership) en función de la altura del relleno para un período de 15 años.

Se observa que el menor coste de implantación de la torre (CAPEX) corresponde a una altura de 2 m. Para alturas menores que ésta (menor relación L/G) el cumplimiento de la carga máxima de aire de la torre (G) obliga a adoptar una mayor sección en planta, lo que encarece la construcción de la torre. Para valores superiores, la carga de agua (L) es el factor que condiciona la superficie en planta de la torre. Como el caudal de agua está fijado por el proceso al que da servicio la torre, tanto la carga de agua como la planta de la torre permanecen constantes y el aumento del coste se debe a una mayor altura de la torre.

El gasto en electricidad debido a ventilación (OPEX_V) disminuye a medida que aumenta la altura de la torre, dado que la relación L/G necesaria es mayor, y por tanto el caudal de aire necesario es menor. Por el contrario, el gasto en electricidad debido a bombeo de agua (OPEX_B) se incrementa a medida que aumenta la altura de la torre, de forma proporcional a ésta. El efecto combinado de ambos gastos (OPEX) alcanza un valor mínimo para una altura de relleno de 4 m.

Como consecuencia de lo anterior, el coste total (TCO) alcanza un valor óptimo (mínimo) para una altura de relleno de 3 m, que es el valor de diseño que se adopta finalmente.

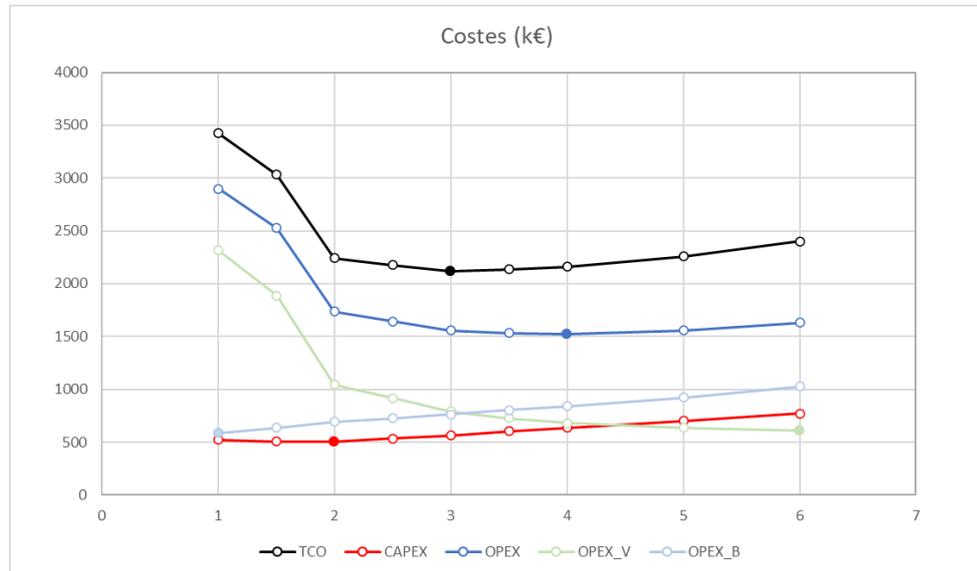


Figura 6.1.- Costes en función de la altura del relleno (m)

7. Solución propuesta

7.1.- DIMENSIONADO TÉRMICO

Tras haber estudiado

- el proceso al que presta servicio la torre
- la tipología más adecuada al caso
- la transferencia de masa y de energía entre el agua y el aire
- los costes de construcción y de operación de la torre

se ha encontrado una solución óptima que determina los siguientes parámetros principales de diseño:

DIMENSIONADO TÉRMICO		
N	Número de celdas (-)	3
H	Altura relleno (m)	3
I	Lado relleno (m)	7
L/G	Relación L/G	2,248

Tabla 6.1.-Parámetros de diseño para relleno elegido

7.2.- PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACIÓN

A partir de los parámetros de diseño anteriores se determinan de forma detallada el resto de los parámetros de la torre, tal como se explicó en el apartado 5.6. y queda documentado en los planos del proyecto. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Símb.	PARÁMETROS	
h_v	Altura de ventanas (m)	1,75
V_b	Volumen interior de la balsa (m^3)	175,00
h_b	Altura de la balsa (m)	1,19
n_{cvc}	Número de cerramientos verticales ciegos (-)	4
h_{cvc}	Altura de cerramientos verticales ciegos (m)	9,44
n_{cvv}	Número de cerramientos verticales con ventana (-)	6
h_{cvv}	Altura de cerramientos verticales con ventana (m)	7,69
l_e	Longitud exterior de la torre (m)	22,20
a_e	Ancho exterior de la torre (m)	7,60
Z_c	Cota de la cubierta (m)	9,68
D_v	Diámetro del ventilador (m)	4,455
D_d	Diámetro mayor del difusor (m)	5
n_{vc}	Número de viguetas de apoyo de canales (-)	15
n_{vt}	Número de viguetas de apoyo de tabique distribuidor (-)	6
l_v	Longitud de vigueta de apoyo (m)	7,60
n_c	Número de canales (-)	30
l_c	Longitud de canales (m)	7,30
n_l	Tramos de listones por celda (-)	6
Q_b	Caudal por bomba ($\frac{m^3}{h}$)	1155
h_{ba}	Altura de bombeo (m)	7,44
V_a	Caudal ventilador ($\frac{m^3}{h}$)	889680

Tabla 6.2.-Geometría resultante para relleno elegido

7.3.- COSTE DE EJECUCIÓN

Una vez determinadas todas las características de la torre de refrigeración, se hallan las mediciones de cada uno de los elementos que componen la instalación, que, junto con el precio por unidad, permiten obtener el coste total, tal como se detalla en los documentos de presupuesto y se resume en la siguiente tabla:

MEDICIONES		PRECIOS	TOTAL
ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO			
Excavación a cielo abierto (m ³)	84,360	20,23	1706,60
CIMENTACIONES			
Placa de cimentación (m ³)	67,488	239,99	16196,45
Encofrado (m ²)	23,84	22,21	529,49
ESTRUCTURA DE HORMIGÓN Y FÁBRICA			
Cerramientos verticales (m ³)	182,997	341,07	62414,84
Placa de cubierta (m ²)	121,957	115,17	14045,74
Canal colector (m ²)	33,300	115,17	3835,16
Difusor (m ³)	2,264	341,07	772,27
Vigueta prefabricada (m)	159,60	10,94	1746,02
Tabique palomero (m ²)	47,25	29,01	1370,72
Anclajes estructurales (ud)	300,00	8,09	2427
ESTRUCTURA METÁLICA			
Estructura escalera (kg)	3030,39	9,56	28970,56
Estructura barandilla (kg)	797,72	13,01	10378,34
Pavimento rejilla rellanos (m ²)	9,44	63,26	597,20
Peldaños rejilla (ud)	43	41,01	1763,43

MEDICIONES		PRECIOS	TOTAL
DISTRIBUCIÓN DE AGUA			
Canal de chapa galvanizada (m ²)	262,8	30,24	7947,07
Malla de soporte (m ²)	441	8,09	3567,69
Listones (m)	11025	8,06	88861,50
Boquillas y platos difusores (ud)	300	6,51	1953
VENTILACIÓN Y BOMBEO			
Separador de gotas (m ²)	521,5	24,87	12969,71
Bombas de agua (ud)	2	42239,21	84478,42
Ventiladores de aire (ud)	3	2778,4	8335,20
Motores para ventiladores de aire (ud)	3	1345,69	4037,07
Reductor para equipo mecánico (ud)	3	1639,17	4917,51
Eje de transmisión equipo ventilación (ud)	3	420,56	1261,68

Tabla 6.3.-Mediciones y coste total de cada elemento de la instalación

La suma del coste de cada uno de los elementos permite obtener el total de los costes directos. Además, tal y como se había explicado anteriormente, habría que sumar a lo anterior los gastos generales e impuestos, para finalmente hallar el coste total de la implementación de la torre de refrigeración para una altura de relleno de 3 metros, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

TOTAL COSTES DIRECTOS		365.082,66
GASTOS GENERALES		
Costes indirectos de presupuesto (%)	3	10.952,48
Costes indirectos de venta (%)	3	10.952,48
Costes indirectos de estudio (%)	3	10.952,48
Gastos generales	14	51.111,57
Beneficio industrial (%)	5	18.254,13
TOTAL SIN IMPUESTOS		467.305,80
IMPUESTOS		
IVA (%)	21	98.134,22
TOTAL		565.440,02

Tabla 6.4.-Resumen del Total de Costes

7.4.- PLANIFICACIÓN EJECUCIÓN

El plazo para la ejecución de la torre de refrigeración, contando la fase de ingeniería, la compra de materiales y equipo, y la construcción en campo, es de 4 meses.

El horario laboral considerado es de lunes a viernes en jornada de 8 horas.

La organización temporal de las distintas tareas se resume en el diagrama de Gantt mostrado a continuación:

Id	Modo de tarea	EDT	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Gantt Chart																																			
						04 sep '23	11 sep '23	18 sep '23	25 sep '23	02 oct '23	09 oct '23	16 oct '23	23 oct '23	30 oct '23	06 nov '23	13 nov '23	20 nov '23	27 nov '23	04 dic '23	11 dic '23	18 dic '23	25 dic '23	01 ene '24	08 ene '24	15 ene '24	22 ene '24	29 ene '24	05 feb '24	12 feb '24	19 feb '24	26 feb '24	04 mar '24	11 mar '24	18 mar '24							
1		1	Ingeniería	7 días	lun 04/09/23	[Gantt bar for Ingeniería]																																			
2		1.1	Parámetros iniciales de diseño	1 día	lun 04/09/23	[Gantt bar for 1.1]																																			
3		1.2	Obtención de la curva característica del relleno	1 día	lun 04/09/23	[Gantt bar for 1.2]																																			
4		1.3	Dimensionado de la torre	1 día	mar 05/09/23	[Gantt bar for 1.3]																																			
5		1.4	Hoja de datos de la torre de refrigeración	1 día	mar 05/09/23	[Gantt bar for 1.4]																																			
6		1.5	Hoja de datos del equipo mecánico y eléctrico	5 días	mié 06/09/23	[Gantt bar for 1.5]																																			
7		1.6	Planos de la estructura y componentes internos	5 días	mar 05/09/23	[Gantt bar for 1.6]																																			
8		2	Compra de materiales y equipo	10 días	mié 06/09/23	[Gantt bar for 2]																																			
9		2.1	Estructura	10 días	mié 06/09/23	[Gantt bar for 2.1]																																			
10		2.1.1	Estructura y cerramiento	5 días	mié 06/09/23	[Gantt bar for 2.1.1]																																			
11		2.1.2	Sistema de distribución de agua	5 días	vie 15/09/23	[Gantt bar for 2.1.2]																																			
12		2.1.3	Difusor del ventilador	1 día	mié 06/09/23	[Gantt bar for 2.1.3]																																			
13		2.1.4	Relleno	1 día	jue 07/09/23	[Gantt bar for 2.1.4]																																			
14		2.1.5	Separador de gotas	1 día	lun 11/09/23	[Gantt bar for 2.1.5]																																			
15		2.2	Equipo mecánico	6 días	mar 12/09/23	[Gantt bar for 2.2]																																			
16		2.2.1	Ventilador	5 días	mar 12/09/23	[Gantt bar for 2.2.1]																																			
17		2.2.2	Reductor y Transmisión	3 días	vie 15/09/23	[Gantt bar for 2.2.2]																																			
18		2.2.3	Bomba de impulsión	1 día	mié 20/09/23	[Gantt bar for 2.2.3]																																			
19		2.3	Equipo eléctrico	2 días	mié 20/09/23	[Gantt bar for 2.3]																																			
20		2.3.1	Motor del ventilador	1 día	mié 20/09/23	[Gantt bar for 2.3.1]																																			
21		2.3.2	Control y cableado	1 día	jue 21/09/23	[Gantt bar for 2.3.2]																																			
22		3	Construcción de la Torre	70,09 días	vie 15/09/23	[Gantt bar for 3]																																			
23		3.1	Acondicionamiento del terreno	10,5 horas	vie 15/09/23	[Gantt bar for 3.1]																																			
24		3.2	Cimentaciones	3,5 días	lun 18/09/23	[Gantt bar for 3.2]																																			
25		3.2.1	Losa de cimentación	28 horas	lun 18/09/23	[Gantt bar for 3.2.1]																																			
26		3.2.2	Encofrado para losa de cimentación	11 horas	lun 18/09/23	[Gantt bar for 3.2.2]																																			
27		3.3	Estructuras	47,28 días	jue 21/09/23	[Gantt bar for 3.3]																																			
28		3.3.1	Acero	21,91 días	jue 21/09/23	[Gantt bar for 3.3.1]																																			
29		3.3.1.1	Acero en estructura de escaleras y rampas	126 horas	jue 21/09/23	[Gantt bar for 3.3.1.1]																																			
30		3.3.1.2	Acero en barandillas de escalera, rampas, pasarelas y plataformas de trabajo	46,75 horas	lun 16/10/23	[Gantt bar for 3.3.1.2]																																			
31		3.3.1.3	Pavimento de rejilla electrosoldada.	1,5 horas	mar 24/10/23	[Gantt bar for 3.3.1.3]																																			
32		3.3.1.4	Peldaño de rejilla electrosoldada.	2,5 horas	mar 24/10/23	[Gantt bar for 3.3.1.4]																																			
33		3.3.2	Hormigón armado	25,69 días	mar 24/10/23	[Gantt bar for 3.3.2]																																			
34		3.3.2.1	Cerramientos Verticales	108,5 horas	mar 24/10/23	[Gantt bar for 3.3.2.1]																																			
35		3.3.2.2	Placa Cubierta	38,5 horas	mar 14/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.2]																																			
36		3.3.2.3	Canal Colector	21 horas	lun 20/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.3]																																			
37		3.3.2.4	Difusor	3 horas	jue 23/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.4]																																			
38		3.3.2.5	Vigueta prefabricada	8 horas	jue 23/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.5]																																			
39		3.3.2.6	Tabique palomero	12 horas	vie 24/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.6]																																			
40		3.3.2.7	Anclajes estructurales	14,5 horas	mar 28/11/23	[Gantt bar for 3.3.2.7]																																			
41		3.4	Sistema de distribución de agua	14,31 días	jue 30/11/23	[Gantt bar for 3.4]																																			
42		3.4.1	Canal de chapa galvanizada	8,25 horas	jue 30/11/23	[Gantt bar for 3.4.1]																																			
43		3.4.2	Malla de soporte	14 horas	vie 01/12/23	[Gantt bar for 3.4.2]																																			
44		3.4.3	Boquillas y Platos difusores	9,5 horas	mar 05/12/23	[Gantt bar for 3.4.3]																																			
45		3.4.4	Listones	82,75 horas	jue 07/12/23	[Gantt bar for 3.4.4]																																			
46		3.5	Ventilación	3,69 días	vie 22/12/23	[Gantt bar for 3.5]																																			
47		3.5.1	Separador de gotas	16,5 horas	vie 22/12/23	[Gantt bar for 3.5.1]																																			
48		3.5.2	Ventilador	13 horas	mié 27/12/23	[Gantt bar for 3.5.2]																																			
49		3.5.3	Motor trifásico para ventilador	7 horas	mié 27/12/23	[Gantt bar for 3.5.3]																																			
50		3.5.4	Reductor para sistema de transmisión del equipo mecánico	7 horas	mié 27/12/23	[Gantt bar for 3.5.4]																																			
51		3.5.5	Eje de transmisión del equipo de ventilación	7 horas	mié 27/12/23	[Gantt bar for 3.5.5]																																			
52		3.6	Bomba de impulsión de agua	5 horas	jue 28/12/23	[Gantt bar for 3.6]																																			

Proyecto: uo265343
Fecha: lun 03/07/23

Tarea	Resumen	Hito inactivo	solo duración	solo el comienzo	Hito externo	División crítica
División	Resumen del proyecto	Resumen inactivo	Informe de resumen manual	solo fin	Fecha límite	Progreso
Hito	Tarea inactiva	Tarea manual	Resumen manual	Tareas externas	Tareas críticas	Progreso manual

Página 1

8. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el diseño básico de una torre de refrigeración evaporativa para el condensador de una planta de tratamiento de acero líquido, evaluando qué altura de relleno tendría una repercusión económica más baja para su implementación y funcionamiento. Para ello, se han realizado las siguientes tareas:

- Se ha investigado el proceso al que la torre da servicio, permitiendo entender el impacto que tienen las diferentes especificaciones en la demanda de refrigeración.
- Se han analizado los principales rasgos, ventajas e inconvenientes de las diferentes configuraciones que puede adoptar una torre de refrigeración evaporativa y se han estudiado los parámetros constitutivos de la instalación objeto de estudio.
- Se ha utilizado la Teoría de Merkel para refrigeración evaporativa, junto con propiedades termodinámicas del aire húmedo, para la creación de una herramienta práctica de uso sencillo (hoja de Excel) que permite realizar múltiples cálculos del proyecto de una manera cómoda, y que puede servir para otras instalaciones similares que deseen proyectarse en el futuro.
- Se ha realizado una búsqueda en diferentes suministradores y empresas para obtener una serie de precios determinados de cada elemento que compone la torre de refrigeración, con el objetivo de calcular el presupuesto final y el consumo eléctrico de la instalación.

En lugar de valorar una solución única, se han planteado nueve posibles alternativas de diseño para la torre de refrigeración en función de la altura de relleno, y tomando la solución óptima, en base al coste de inversión inicial más el coste energético de operación. Se concluye que:

- Se trata de una torre de refrigeración evaporativa, abierta, con ventilador axial de tiro inducido, con flujo a contracorriente, con un relleno de goteo, montada en obra y con una disposición lineal.
- La torre constará de 3 celdas y las dimensiones generales de la misma serán de 7 metros en el interior por cada lado y una altura de 9,44 metros hasta la cubierta.
- El plazo para lograr la implantación de la instalación es de 4 meses, considerando las etapas de ingeniería, compra de suministro y construcción en planta.
- El coste de inversión de la torre será de 565.440,02 € y el coste de la energía eléctrica durante los primeros 15 años asciende a 1.555.513,2 €.

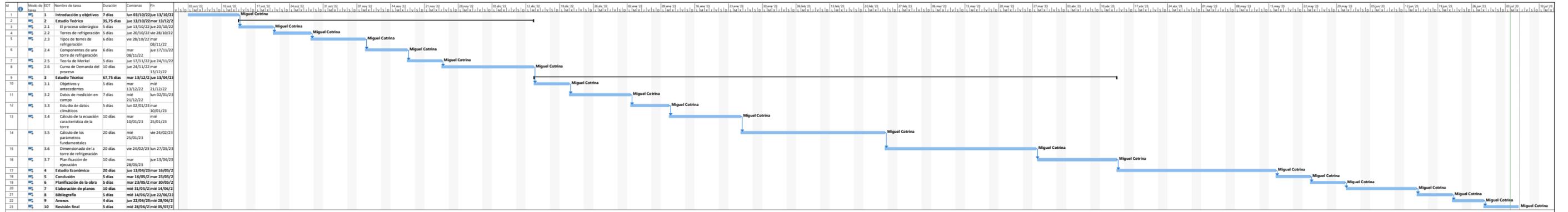
La torre de refrigeración supone una solución eficaz para enfriar el agua en este caso de estudio, además de ser amable con el medio ambiente. El consumo energético para enfriar el agua es bajo, por lo que, en consecuencia, las emisiones producidas también son leves. Asimismo, el consumo de agua también es moderado y solo una pequeña parte se pierde por evaporación y arrastre.

Las torres son instalaciones seguras, ya que tienen un funcionamiento a presiones bajas, con un mantenimiento sencillo y que, con una limpieza adecuada, se consideran sin riesgo para la salud. Su vida útil es de unos 20 años, con ahorros energéticos y de agua considerables, consiguiendo, por tanto, un rendimiento elevado a nivel industrial.

9. Planificación del TFG

Para la elaboración del presente TFG se han empleado 9 meses. La primera etapa se ha basado en un estudio de los fundamentos teóricos y los principios de funcionamiento para poder obtener la curva de demanda del proceso y posteriormente realizar un estudio técnico con el objetivo de obtener el dimensionado de la torre de refrigeración. Finalmente, se ha elaborado un estudio económico y la planificación, dando todo el conjunto forma a la presente memoria.

Se ha dedicado una media de 20 horas semanales, donde la carga de trabajo principal se ha realizado en los días festivos y fines de semana. En la siguiente figura aparece desglosado todo el proceso detalladamente:



10. Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Nombre
A	°C	Aproximación
a	$\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$	Área específica de intercambio del relleno
a_c	m	Anchura de canales
a_e	m	Ancho exterior de la torre
Δh_{agua}	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Variación de la entalpía del agua
Δh_{aire}	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Variación de la entalpía del aire
C	–	Parámetro característico de la torre que depende principalmente del tipo de relleno
c_{pa}	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Capacidad calorífica del aire húmedo
c_{pw}	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_w \cdot \text{K}}$	Capacidad calorífica del agua
CWT	°C	Temperatura de agua fría
D	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del aire
dA	m^2	Área de intercambio por cada metro cuadrado de planta de la torre
D_d	m	Diámetro mayor del difusor

dm_w	$\frac{m^3}{h}$	Flujo másico de agua transferido de la interfase al aire (por m^2 de planta de la torre)
dq	$\frac{W}{m^2}$	Calor total
dq_s	$\frac{W}{m^2}$	Calor sensible
dq_l	$\frac{W}{m^2}$	Calor latente
dt	K	Temperatura del agua
D_v	m	Diámetro del ventilador
dV	$\frac{m^3}{m^2}$	Volumen del relleno por cada metro cuadrado de planta de la torre
dz	m	Rebanada infinitesimal de espesor
e	m	Espesor cerramiento
e_c	m	Espesor cubierta
e_d	m	Espesor difusor
e_{lc}	m	Espesor losa cimentación
G	$\frac{kg_w}{s \cdot m^2}$	Caudal de aire por m^2 de planta de la torre
H	m	Altura del relleno
$H.R._{aire,sal}$	%	Humedad relativa del aire a la salida de la torre
h''	$\frac{kJ}{kg_{as}}$	Entalpía específica de la interfase
h_a	$\frac{kJ}{kg_{as}}$	Entalpía específica del aire
$h_{aire,ent}$	$\frac{kJ}{kg}$	Entalpía de entrada del aire en la torre

$h_{\text{aire,sal}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Entalpía de salida del aire en la torre
h_b	m	Altura de la balsa
h_{ba}	m	Altura de bombeo
h_c	m	Altura de canales
h_{cvc}	m	Altura de cerramientos verticales ciegos
h_{cvv}	m	Altura de cerramientos verticales con ventana
h_d	m	Altura del difusor
h_p	m	Altura plenum
h_{rc}	m	Altura de relleno a canales
h_v	m	Altura de ventanas
h_{vr}	m	Altura de ventana a relleno
HWT	°C	Temperatura de agua caliente
K	$\frac{\text{kg}}{\frac{\text{s}}{\text{m}^3}}$	Característica del relleno
K'	$\frac{\frac{\text{kg}_w}{\text{s}}}{\text{m}^2 \cdot \frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{\text{as}}}}$	Coefficiente de transferencia de masa en términos de diferencia de humedad absoluta
K_G	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	Coefficiente global de transferencia de calor
L	$\frac{\frac{\text{kg}_w}{\text{s}}}{\text{m}^2}$	Caudal de agua por m ² de planta de la torre
l	m	Lado de la torre
L/G	–	Variable de operación de la torre
l_c	m	Longitud de canales

l_e	m	Longitud exterior de la torre
l_r	m	Longitud de rellanos
l_v	m	Longitud de vigueta de apoyo
\dot{m}_a	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Caudal de aire
n	–	Parámetro característico de la torre que depende principalmente del tipo de relleno
N_b	–	Número de bombas
n_c	–	Número de canales
N_{cel}	–	Número de celdas de la torre
n_{cvc}	–	Número de cerramientos verticales ciegos
n_{cvv}	–	Número de cerramientos verticales con ventana
n_l	–	Tramos de listones por celda
NPA	%	Nivel percentil anual
NPE	%	Nivel percentil estacional
N_{pe}	$\frac{\text{ud}}{\text{m}}$	Número de peldaños por metro de altura
NTU	–	Número de Unidades de Transferencia
NTU_{ava}	–	Coficiente disponible o característica de la torre
NTU_{req}	–	Coficiente requerido o demanda
n_{vc}	–	Número de viguetas de apoyo de canales
n_{vt}	–	Número de viguetas de apoyo de tabique distribuidor

P	Pa	Presión estática
P_{be}	$\frac{\text{kg}}{\text{m}}$	Peso barandilla por metro de altura
P_{ee}	$\frac{\text{kg}}{\text{m}}$	Peso estructura escalera por metro de altura
Q_b	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	Caudal por bomba
R	°C	Rango
s_c	m	Separación canales de distribución
sh_l	m	Separación horizontal listones
s_m	m	Separación mallas de apoyo del relleno
S_{re}	$\frac{\text{m}^2}{\text{m}}$	Superficie de rellanos por metro de altura
s_s	m	Separación láminas separador de gotas
S_{tot}	m^2	Superficie total de la torre
s_v	m	Separación de viguetas de apoyo de canales
sv_l	m	Separación vertical listones
t	°C	Temperatura de la interfase
t_a	°C	Temperatura del aire
t_{ac}	min	Tiempo de acumulación de agua
$T_{aire,sal}$	°C	Temperatura de aire a la salida de la torre
V	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$	Volumen del relleno
V_a	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	Caudal ventilador

V_b	m^3	Volumen interior de la balsa
\dot{V}_w	$\frac{m^3}{h}$	Caudal de agua a enfriar
w	$\frac{kg_w}{kg_{as}}$	Humedad absoluta del aire
w''	$\frac{kg_w}{kg_{as}}$	Humedad absoluta de la interfase
WBT	$^{\circ}C$	Temperatura de bulbo húmedo
Z_c	m	Cota de la cubierta
λ	$\frac{kJ}{kg_w}$	Entalpía de vaporización del agua

11. Bibliografía

11.1.- OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

- 1] Mittal, A. (2007). *El proceso siderúrgico (2ª ed.)*. Grafinsa.
- 2] *Beneficios del enfriamiento evaporativo: torres de refrigeración y condensadores evaporativos - caloryfrio.com*. (Último acceso: Mayo 2023). Caloryfrio.com - Todo sobre calefacción, aire acondicionado, ahorro y eficiencia energética, energías renovables y sanitarios. <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/frio-industrial/beneficios-enfriamientoevaporativo.html#:~:text=Menor%20impacto%20por%20efecto%20invernadero,de%20la%20correspondiente%20energía%20eléctrica.>
- 3] *¿Qué es la colada continua y cuáles son sus ventajas?* | Alsimet. (Último acceso: Mayo 2023). Alsimet | Comercialización de metales férricos y no férricos, corte a medida y acabados. <http://alsimet.es/es/noticias/que-es-la-colada-continua-ventajas>
- 4] *Comportamiento termo fluidodinámico del acero en un molde de colada continua: una revisión* | TecnoLógicas. (Último acceso: Mayo 2023). Portal de Revistas ITM. <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/1856/2056>
- 5] *Desgasificación de acero... ¿Qué es? Descubre una de las aplicaciones más interesantes del vacío - Marpa Vacuum*. (Último acceso: Mayo 2023). Marpa Vacuum. <https://marpavacuum.com/desgasificacion-acero-que-es/>
- 6] *Descarburación (Acero)*. (Último acceso: Mayo 2023). Glosarios especializados. <https://glosarios.servidor-alicante.com/acero/descarburacion>
- 7] García Suárez, A. (2017). *Simulación de la metalurgia secundaria* [Proyecto Fin de Master, Universidad de Oviedo] (Último acceso: Mayo 2023). <https://doi.org/chrome->

[extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43718/TFM_AdrianGarciaSuarez.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43718/TFM_AdrianGarciaSuarez.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- 8] *Tratamientos térmicos.* (Último acceso: Mayo 2023). [http://wordpress.com. https://chirinoasilvaroger.files.wordpress.com/2015/10/tratamientos-termicos.pdf](http://wordpress.com.https://chirinoasilvaroger.files.wordpress.com/2015/10/tratamientos-termicos.pdf)

11.2.- TIPOS DE TORRES DE REFRIGERACIÓN

- 9] *Torres de enfriamiento – información.* (Último acceso: mayo 2023). Tratamiento y purificación del agua - Lenntech. <https://www.lenntech.es/productos/cooling-tower-information.htm>
- 10] *Guía Legionella. Capítulo 4: Torres de refrigeración y condensadores evaporativos - Autocontrol PLAN.* (Último acceso: mayo 2023). Autocontrol PLAN. <https://www.autocontrolplan.es/guia-legionella-torres-de-refrigeracion-y-condensadores-evaporativos/>
- 11] *Torres de refrigeración: refrigeración industrial eficiente.* (Último acceso: mayo 2023). Aire Comprimido, refrigeración y climatización Industrial. <https://www.seguas.com/torres-refrigeracion-refrigeracion-industrial-eficiente/>
- 12] *Torre de enfriamiento en seco húmedo con alta eficiencia y ahorro de energía.* (Último acceso: mayo 2023). Closed & Open Circuit Cooling Tower Manufacturer & Supplier. <https://www.flycoolingtower.com/es/products/hybrid-wet-dry-cooling-tower/index.html>
- 13] *La tecnología del relleno en torres de refrigeración %.* (Último acceso: mayo 2023). TorraVal Cooling. <https://www.torraval.com/relleno-en-torres-de-refrigeracion/>
- 14] Parra Sanchez, R. (2018). *Estudio técnico económico de la implantación industrial de una torre de refrigeración* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid] (Último acceso: Mayo 2023). https://doi.org/chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://oa.upm.es/52155/1/PFC_RAQUEL_PARRA_SANCHEZ.pdf

- 15] Del Olmo Duarte, V. (2013). *Diseño y simulación de torres de refrigeración húmedas* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid] (Último acceso: Mayo 2023). <https://doi.org/chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/29405325.pdf>
- 16] Minguito García, A. (2015). *CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE TORRES DE REFRIGERACIÓN HÍBRIDAS* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid] (Último acceso: Mayo 2023). https://doi.org/chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/24076/TFG_Alberto_Minguito_Garcia_2015.pdf
- 17] *RELLENOS PARA TORRE DE REFRIGERACIÓN*. (Último acceso: mayo 2023). <http://jnegre.es/http://jnegre.es/Descargas/farciment.pdf>
- 18] *Clasificación de Torres de Enfriamiento | PDF | Temperatura | Convección*. (Último acceso: mayo2023). Scribd. <https://es.scribd.com/document/362714159/Clasificacion-de-Torres-de-Enfriamiento>
- 19] *Refrigeración evaporativa 101*. (Último acceso: mayo 2023). EVAPCO. <https://www.evapco.com/es/node/41310>
- 20] *Un gran clásico, torres de enfriamiento – Revista Cero Grados*. (Último acceso: mayo 2023). Revista Cero Grados. <https://0grados.com/gran-clasico-torres-enfriamiento/>
- 21] *TORRE DE ENFRIAMIENTO | ¿qué es? ¿cómo funciona?* (Último acceso: mayo 2023). Torre de Enfriamiento de Agua. <https://torredeenfriamientodeagua.com/>
- 22] Gerfri. (2018, April 4) (Último acceso: mayo 2023). *Torres De Enfriamiento o Refrigeración ® Funcionamiento y Ventajas*. Tu Aire Acondicionado. <https://tuaireacondicionado.net/torres-de-enfriamiento-refrigeracion/>

- 23] *Torre de refrigeración - ACR.* (Último acceso: mayo 2023). ACR - Aplicaciones Comerciales de Refrigeración SL. <https://acref.es/fabricantes/teva/torre-de-refrigeracion/>
- 24] *Torres de refrigeración montadas en campo FECT TORRAVAL.* (Último acceso: mayo 2023). Torraval Cooling. <https://www.torraval.com/torres-de-refrigeracion-de-circuito-abierto/torres-de-refrigeracion-montadas-en-campo/>

11.3.- COMPONENTES DE UNA TORRE

- 24] *Torres de refrigeracion Serie OC - Industria alimentaria - Torres de refrigeracion.* (Último acceso: mayo 2023). Interempresas: Productos e Información para la industria y la empresa. <https://www.interempresas.net/Alimentaria/FeriaVirtual/Producto-Torres-de-Refrigeracion-Serie-OC-158259.html>
- 25] *Curso online de Torres de Refrigeración.* (Último acceso: mayo 2023). Curso online de Torres de Refrigeración. <https://torresderefrigeracion.org/#partes-de-una-torre-de-refrigeracion>
- 26] *Corrosión en torres de refrigeración - TORRAVAL Cooling.* (Último acceso: mayo 2023). Torraval Cooling. <https://www.torraval.com/corrosion-en-torres-de-refrigeracion/>
- 27] *Separador de gotas para torres de refrigeración de alta eficacia.* (Último acceso: mayo 2023). Torraval Cooling. <https://www.torraval.com/repuestos-para-torres-de-refrigeracion/separador-de-gotas/>
- 28] *Equipo mecánico para torres de refrigeración: Motores, ventiladores...* (Último acceso: mayo 2023). Torraval Cooling. <https://www.torraval.com/repuestos-para-torres-de-refrigeracion/equipo-mecanico/>
- 29] *Bombas ESN para torres de refrigeración.* (Último acceso: mayo 2023). Fabricante de Bombas Centrífugas | Boulton Pumps. <https://www.boultonpumps.com/bombas-esn-para-torres-de-refrigeracion-n-23-es>

-
- 30] *Curso online de torres de refrigeración.* (Último acceso: mayo 2023). Curso online de Torres de Refrigeración. <https://torresderefrigeracion.org/#partes-de-una-torre-de-refrigeracion>
- 31] *¿Cómo funciona una bomba de impulsión?* | Fontaneria Lucero. (Último acceso: mayo 2023). Blog sobre fontanería | Fontanería Lucero. <https://www.fontanerialucero.es/como-funciona-una-bomba-de-impulsion/#!>
- 32] *Principio de funcionamiento del motor de engranaje de ventilador industrial - taizhou beier electromecánica technology co., ltd.* (Último acceso: mayo 2023). Ventiladores Axiales HVAC Fabricantes, Proveedores de Ventiladores EC, Fábrica. <https://es.axial-fan.net/news/principio-de-funcionamiento-del-motor-de-engranaje-de-ventilador-industrial.html>
- 33] *Que es una torre de refrigeración.* (Último acceso: mayo 2023). Acuaser. <https://acuaser.es/blog/que-es-una-torre-de-refrigeracion/>
- 34] *¿Que es una torre de enfriamiento industrial?* (Último acceso: mayo 2023). Frio Industrial y Climatizacion Comercial. Software Eficiencia Energetica. <https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/que-es-una-torre-de-enfriamiento-industrial/>

11.4.- ESTUDIO TÉCNICO

- 35] Diaz Trapiella, J. (2022). *Torre de Refrigeración.* (Último acceso: junio 2023)
- 36] Diaz Trapiella, J. (2021). *Curvas demanda.* (Último acceso: junio 2023)
- 37] *Guía Técnica Condiciones climáticas exteriores del proyecto.* (2010, junio). Inicio | Idae. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12_Guia_tecnica_condiciones_climaticas_exteriores_de_proyecto_e4e5b769.pdf
- 38] Jimenez García, A. (2022). *Redimensionado de una torre de refrigeración por traslado de una instalación productiva desde Tabaza (España) a Turabao*

(*Brasil*) [Proyecto Fin de Grado, Universidad de Oviedo] (Último acceso: junio 2023). https://doi.org/chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/64306/TFG_AlejandroJimenezGarcia.pdf?sequence=4

12. Anexos

12.1.- TABLA DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HÚMEDO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Table 2 Thermodynamic Properties of Moist Air at Standard Atmospheric Pressure, 101.325 kPa

Temp., °C <i>t</i>	Humidity Ratio, kg(w)/kg(da) <i>W_s</i>	Specific Volume, m ³ /kg (dry air)			Specific Enthalpy, kJ/kg (dry air)			Specific Entropy, kJ/(kg · K) (dry air)			Condensed Water			Temp., °C <i>t</i>
		<i>v_{da}</i>	<i>v_{as}</i>	<i>v_s</i>	<i>h_{da}</i>	<i>h_{as}</i>	<i>h_s</i>	<i>s_{da}</i>	<i>s_{as}</i>	<i>s_s</i>	Specific	Specific	Vapor	
											Enthalpy, kJ/kg <i>h_w</i>	Entropy, kJ/(kg·K) <i>s_w</i>	Pressure, kPa <i>P_s</i>	
-60	0.0000067	0.6027	0.0000	0.6027	-60.351	0.017	-60.334	-0.2495	0.0001	-0.2494	-446.29	-1.6854	0.00108	-60
-59	0.0000076	0.6056	0.0000	0.6056	-59.344	0.018	-59.326	-0.2448	0.0001	-0.2447	-444.63	-1.6776	0.00124	-59
-58	0.0000087	0.6084	0.0000	0.6084	-58.338	0.021	-58.317	-0.2401	0.0001	-0.2400	-442.95	-1.6698	0.00141	-58
-57	0.0000100	0.6113	0.0000	0.6113	-57.332	0.024	-57.308	-0.2354	0.0001	-0.2353	-441.27	-1.6620	0.00161	-57
-56	0.0000114	0.6141	0.0000	0.6141	-56.326	0.028	-56.298	-0.2308	0.0001	-0.2306	-439.58	-1.6542	0.00184	-56
-55	0.0000129	0.6170	0.0000	0.6170	-55.319	0.031	-55.288	-0.2261	0.0002	-0.2260	-437.89	-1.6464	0.00209	-55
-54	0.0000147	0.6198	0.0000	0.6198	-54.313	0.036	-54.278	-0.2215	0.0002	-0.2214	-436.19	-1.6386	0.00238	-54
-53	0.0000167	0.6226	0.0000	0.6227	-53.307	0.041	-53.267	-0.2170	0.0002	-0.2168	-434.48	-1.6308	0.00271	-53
-52	0.0000190	0.6255	0.0000	0.6255	-52.301	0.046	-52.255	-0.2124	0.0002	-0.2122	-432.76	-1.6230	0.00307	-52
-51	0.0000215	0.6283	0.0000	0.6284	-51.295	0.052	-51.243	-0.2079	0.0002	-0.2076	-431.03	-1.6153	0.00348	-51
-50	0.0000243	0.6312	0.0000	0.6312	-50.289	0.059	-50.230	-0.2033	0.0003	-0.2031	-429.30	-1.6075	0.00394	-50
-49	0.0000275	0.6340	0.0000	0.6341	-49.283	0.067	-49.216	-0.1988	0.0003	-0.1985	-427.56	-1.5997	0.00445	-49
-48	0.0000311	0.6369	0.0000	0.6369	-48.277	0.075	-48.202	-0.1944	0.0004	-0.1940	-425.82	-1.5919	0.00503	-48
-47	0.0000350	0.6397	0.0000	0.6398	-47.271	0.085	-47.186	-0.1899	0.0004	-0.1895	-424.06	-1.5842	0.00568	-47
-46	0.0000395	0.6426	0.0000	0.6426	-46.265	0.095	-46.170	-0.1855	0.0004	-0.1850	-422.30	-1.5764	0.00640	-46
-45	0.0000445	0.6454	0.0000	0.6455	-45.259	0.108	-45.151	-0.1811	0.0005	-0.1805	-420.54	-1.5686	0.00721	-45
-44	0.0000500	0.6483	0.0001	0.6483	-44.253	0.121	-44.132	-0.1767	0.0006	-0.1761	-418.76	-1.5609	0.00811	-44
-43	0.0000562	0.6511	0.0001	0.6512	-43.247	0.137	-43.111	-0.1723	0.0006	-0.1716	-416.98	-1.5531	0.00911	-43
-42	0.0000631	0.6540	0.0001	0.6540	-42.241	0.153	-42.088	-0.1679	0.0007	-0.1672	-415.19	-1.5453	0.01022	-42
-41	0.0000708	0.6568	0.0001	0.6569	-41.235	0.172	-41.063	-0.1636	0.0008	-0.1628	-413.39	-1.5376	0.01147	-41
-40	0.0000793	0.6597	0.0001	0.6597	-40.229	0.192	-40.037	-0.1592	0.0009	-0.1584	-411.59	-1.5298	0.01285	-40
-39	0.0000887	0.6625	0.0001	0.6626	-39.224	0.216	-39.007	-0.1549	0.0010	-0.1540	-409.77	-1.5221	0.01438	-39
-38	0.0000992	0.6653	0.0001	0.6654	-38.218	0.241	-37.976	-0.1507	0.0011	-0.1496	-407.96	-1.5143	0.01608	-38
-37	0.0001108	0.6682	0.0001	0.6683	-37.212	0.270	-36.942	-0.1464	0.0012	-0.1452	-406.13	-1.5066	0.01796	-37
-36	0.0001237	0.6710	0.0001	0.6712	-36.206	0.302	-35.905	-0.1421	0.0014	-0.1408	-404.29	-1.4988	0.02005	-36
-35	0.0001379	0.6739	0.0001	0.6740	-35.200	0.336	-34.864	-0.1379	0.0015	-0.1364	-402.45	-1.4911	0.02235	-35
-34	0.0001536	0.6767	0.0002	0.6769	-34.195	0.375	-33.820	-0.1337	0.0017	-0.1320	-400.60	-1.4833	0.02490	-34
-33	0.0001710	0.6796	0.0002	0.6798	-33.189	0.417	-32.772	-0.1295	0.0018	-0.1276	-398.75	-1.4756	0.02772	-33
-32	0.0001902	0.6824	0.0002	0.6826	-32.183	0.464	-31.718	-0.1253	0.0020	-0.1233	-396.89	-1.4678	0.03082	-32
-31	0.0002113	0.6853	0.0002	0.6855	-31.178	0.517	-30.661	-0.1212	0.0023	-0.1189	-395.01	-1.4601	0.03425	-31
-30	0.0002346	0.6881	0.0003	0.6884	-30.171	0.574	-29.597	-0.1170	0.0025	-0.1145	-393.14	-1.4524	0.03802	-30
-29	0.0002602	0.6909	0.0003	0.6912	-29.166	0.636	-28.529	-0.1129	0.0028	-0.1101	-391.25	-1.4446	0.04217	-29
-28	0.0002883	0.6938	0.0003	0.6941	-28.160	0.707	-27.454	-0.1088	0.0031	-0.1057	-389.36	-1.4369	0.04673	-28
-27	0.0003193	0.6966	0.0004	0.6970	-27.154	0.782	-26.372	-0.1047	0.0034	-0.1013	-387.46	-1.4291	0.05175	-27
-26	0.0003533	0.6995	0.0004	0.6999	-26.149	0.867	-25.282	-0.1006	0.0037	-0.0969	-385.55	-1.4214	0.05725	-26
-25	0.0003905	0.7023	0.0004	0.7028	-25.143	0.959	-24.184	-0.0965	0.0041	-0.0924	-383.63	-1.4137	0.06329	-25
-24	0.0004314	0.7052	0.0005	0.7057	-24.137	1.059	-23.078	-0.0925	0.0045	-0.0880	-381.71	-1.4059	0.06991	-24
-23	0.0004762	0.7080	0.0005	0.7086	-23.132	1.171	-21.961	-0.0885	0.0050	-0.0835	-379.78	-1.3982	0.07716	-23
-22	0.0005251	0.7109	0.0006	0.7115	-22.126	1.292	-20.834	-0.0845	0.0054	-0.0790	-377.84	-1.3905	0.08510	-22
-21	0.0005787	0.7137	0.0007	0.7144	-21.120	1.425	-19.695	-0.0805	0.0060	-0.0745	-375.90	-1.3828	0.09378	-21
-20	0.0006373	0.7165	0.0007	0.7173	-20.115	1.570	-18.545	-0.0765	0.0066	-0.0699	-373.95	-1.3750	0.10326	-20
-19	0.0007013	0.7194	0.0008	0.7202	-19.109	1.729	-17.380	-0.0725	0.0072	-0.0653	-371.99	-1.3673	0.11362	-19
-18	0.0007711	0.7222	0.0009	0.7231	-18.103	1.902	-16.201	-0.0686	0.0079	-0.0607	-370.02	-1.3596	0.12492	-18
-17	0.0008473	0.7251	0.0010	0.7261	-17.098	2.092	-15.006	-0.0646	0.0086	-0.0560	-368.04	-1.3518	0.13725	-17
-16	0.0009303	0.7279	0.0011	0.7290	-16.092	2.299	-13.793	-0.0607	0.0094	-0.0513	-366.06	-1.3441	0.15068	-16
-15	0.0010207	0.7308	0.0012	0.7320	-15.086	2.524	-12.562	-0.0568	0.0103	-0.0465	-364.07	-1.3364	0.16530	-15
-14	0.0011191	0.7336	0.0013	0.7349	-14.080	2.769	-11.311	-0.0529	0.0113	-0.0416	-362.07	-1.3287	0.18122	-14
-13	0.0012262	0.7364	0.0014	0.7379	-13.075	3.036	-10.039	-0.0490	0.0123	-0.0367	-360.07	-1.3210	0.19852	-13
-12	0.0013425	0.7393	0.0016	0.7409	-12.069	3.327	-8.742	-0.0452	0.0134	-0.0318	-358.06	-1.3132	0.21732	-12
-11	0.0014690	0.7421	0.0017	0.7439	-11.063	3.642	-7.421	-0.0413	0.0146	-0.0267	-356.04	-1.3055	0.23775	-11
-10	0.0016062	0.7450	0.0019	0.7469	-10.057	3.986	-6.072	-0.0375	0.0160	-0.0215	-354.01	-1.2978	0.25991	-10
-9	0.0017551	0.7478	0.0021	0.7499	-9.052	4.358	-4.693	-0.0337	0.0174	-0.0163	-351.97	-1.2901	0.28395	-9
-8	0.0019166	0.7507	0.0023	0.7530	-8.046	4.764	-3.283	-0.0299	0.0189	-0.0110	-349.93	-1.2824	0.30999	-8
-7	0.0020916	0.7535	0.0025	0.7560	-7.040	5.202	-1.838	-0.0261	0.0206	-0.0055	-347.88	-1.2746	0.33821	-7
-6	0.0022811	0.7563	0.0028	0.7591	-6.035	5.677	-0.357	-0.0223	0.0224	-0.0000	-345.82	-1.2669	0.36874	-6
-5	0.0024862	0.7592	0.0030	0.7622	-5.029	6.192	1.164	-0.0186	0.0243	-0.0057	-343.76	-1.2592	0.40178	-5
-4	0.0027081	0.7620	0.0033	0.7653	-4.023	6.751	2.728	-0.0148	0.0264	-0.0115	-341.69	-1.2515	0.43748	-4
-3	0.0029480	0.7649	0.0036	0.7685	-3.017	7.353	4.336	-0.0111	0.0286	-0.0175	-339.61	-1.2438	0.47606	-3
-2	0.0032074	0.7677	0.0039	0.7717	-2.011	8.007	5.995	-0.0074	0.0310	-0.0236	-337.52	-1.2361	0.51773	-2
-1	0.0034874	0.7705	0.0043	0.7749	-1.006	8.712	7.706	-0.0037	0.0336	-0.0299	-335.42	-1.2284	0.56268	-1
0	0.0037895	0.7734	0.0047	0.7781	0.000	9.473	9.473	0.0000	0.0364	0.0364	-333.32	-1.2206	0.61117	0
0*	0.003789	0.7734	0.0047	0.7781	0.000	9.473	9.473	0.0000	0.0364	0.0364	0.06	-0.0001	0.6112	0
1	0.004076	0.7762	0.0051	0.7813	1.006	10.197	11.203	0.0037	0.0391	0.0427	4.28	0.0153	0.6571	1
2	0.004381	0.7791	0.0055	0.7845	2.012	10.970	12.982	0.0073	0.0419	0.0492	8.49	0.0306	0.7060	2
3	0.004707	0.7819	0.0059	0.7878	3.018	11.793	14.811	0.0110	0.0449	0.0559	12.70	0.0459	0.7581	3
4	0.005054	0.7848	0.0064	0.7911	4.024	12.672	16.696	0.0146	0.0480	0.0627	16.91	0.0611	0.8135	4
5	0.005424	0.7876	0.0068	0.7944	5.029	13.610	18.639	0.0182	0.0514	0.0697	21.12	0.0762	0.8725	5
6	0.005818	0.7904	0.0074	0.7978	6.036	14.608	20.644	0.0219	0.0550	0.0769	25.32	0.0913	0.9353	6
7	0.006237	0.7933	0.0079	0.8012	7.041	15.671	22.713	0.0255	0.0588	0.0843	29.52	0.1064	1.0020	7
8	0.006683	0.7961	0.0085	0.8046	8.047	16.805	24.852	0.0290	0.0628	0.0919	33.72	0.1213	1.0729	8
9	0.007157	0.7990	0.0092	0.8081	9.053	18.010	27.064	0.0326	0.0671	0.0997	37.92	0.1362	1.1481	9
10	0.007661	0.8018	0.0098	0.8116	10.059	19.293	29.352	0.0362	0.0717	0.1078	42.11			

Table 2 Thermodynamic Properties of Moist Air at Standard Atmospheric Pressure, 101.325 kPa (Continued)

Temp., °C <i>t</i>	Humidity Ratio, kg(w)/kg(da) <i>W_s</i>	Specific Volume, m ³ /kg (dry air)									Specific Enthalpy, kJ/kg (dry air)									Condensed Water			Temp., °C <i>t</i>
		Specific Volume, m ³ /kg (dry air)			Specific Enthalpy, kJ/kg (dry air)			Specific Entropy, kJ/(kg · K) (dry air)			Specific Enthalpy, kJ/kg <i>h_w</i>	Specific Entropy, kJ/(kg · K) <i>s_w</i>	Vapor Pressure, kPa <i>P_s</i>										
		<i>v_{da}</i>	<i>v_{as}</i>	<i>v_s</i>	<i>h_{da}</i>	<i>h_{as}</i>	<i>h_s</i>	<i>s_{da}</i>	<i>s_{as}</i>	<i>s_s</i>													
14	0.010012	0.8132	0.0131	0.8262	14.084	25.286	39.370	0.0503	0.0927	0.1430	58.88	0.2099	1.5987	14									
15	0.010692	0.8160	0.0140	0.8300	15.090	27.023	42.113	0.0538	0.0987	0.1525	63.07	0.2244	1.7055	15									
16	0.011413	0.8188	0.0150	0.8338	16.096	28.867	44.963	0.0573	0.1051	0.1624	67.26	0.2389	1.8185	16									
17	0.012178	0.8217	0.0160	0.8377	17.102	30.824	47.926	0.0607	0.1119	0.1726	71.44	0.2534	1.9380	17									
18	0.012989	0.8245	0.0172	0.8417	18.108	32.900	51.008	0.0642	0.1190	0.1832	75.63	0.2678	2.0643	18									
19	0.013848	0.8274	0.0184	0.8457	19.114	35.101	54.216	0.0677	0.1266	0.1942	79.81	0.2821	2.1979	19									
20	0.014758	0.8302	0.0196	0.8498	20.121	37.434	57.555	0.0711	0.1346	0.2057	84.00	0.2965	2.3389	20									
21	0.015721	0.8330	0.0210	0.8540	21.127	39.908	61.035	0.0745	0.1430	0.2175	88.18	0.3107	2.4878	21									
22	0.016741	0.8359	0.0224	0.8583	22.133	42.527	64.660	0.0779	0.1519	0.2298	92.36	0.3249	2.6448	22									
23	0.017821	0.8387	0.0240	0.8627	23.140	45.301	68.440	0.0813	0.1613	0.2426	96.55	0.3390	2.8105	23									
24	0.018963	0.8416	0.0256	0.8671	24.146	48.239	72.385	0.0847	0.1712	0.2559	100.73	0.3531	2.9852	24									
25	0.020170	0.8444	0.0273	0.8717	25.153	51.347	76.500	0.0881	0.1817	0.2698	104.91	0.3672	3.1693	25									
26	0.021448	0.8472	0.0291	0.8764	26.159	54.638	80.798	0.0915	0.1927	0.2842	109.09	0.3812	3.3633	26									
27	0.022798	0.8501	0.0311	0.8811	27.165	58.120	85.285	0.0948	0.2044	0.2992	113.27	0.3951	3.5674	27									
28	0.024226	0.8529	0.0331	0.8860	28.172	61.804	89.976	0.0982	0.2166	0.3148	117.45	0.4090	3.7823	28									
29	0.025735	0.8558	0.0353	0.8910	29.179	65.699	94.878	0.1015	0.2296	0.3311	121.63	0.4229	4.0084	29									
30	0.027329	0.8586	0.0376	0.8962	30.185	69.820	100.006	0.1048	0.2432	0.3481	125.81	0.4367	4.2462	30									
31	0.029014	0.8614	0.0400	0.9015	31.192	74.177	105.369	0.1082	0.2576	0.3658	129.99	0.4505	4.4961	31									
32	0.030793	0.8643	0.0426	0.9069	32.198	78.780	110.979	0.1115	0.2728	0.3842	134.17	0.4642	4.7586	32									
33	0.032674	0.8671	0.0454	0.9125	33.205	83.652	116.857	0.1148	0.2887	0.4035	138.35	0.4779	5.0345	33									
34	0.034660	0.8700	0.0483	0.9183	34.212	88.799	123.011	0.1180	0.3056	0.4236	142.53	0.4915	5.3242	34									
35	0.036756	0.8728	0.0514	0.9242	35.219	94.236	129.455	0.1213	0.3233	0.4446	146.71	0.5051	5.6280	35									
36	0.038971	0.8756	0.0546	0.9303	36.226	99.983	136.209	0.1246	0.3420	0.4666	150.89	0.5186	5.9468	36									
37	0.041309	0.8785	0.0581	0.9366	37.233	106.058	143.290	0.1278	0.3617	0.4895	155.07	0.5321	6.2812	37									
38	0.043778	0.8813	0.0618	0.9431	38.239	112.474	150.713	0.1311	0.3824	0.5135	159.25	0.5456	6.6315	38									
39	0.046386	0.8842	0.0657	0.9498	39.246	119.258	158.504	0.1343	0.4043	0.5386	163.43	0.5590	6.9988	39									
40	0.049141	0.8870	0.0698	0.9568	40.253	126.430	166.683	0.1375	0.4273	0.5649	167.61	0.5724	7.3838	40									
41	0.052049	0.8898	0.0741	0.9640	41.261	134.005	175.265	0.1407	0.4516	0.5923	171.79	0.5857	7.7866	41									
42	0.055119	0.8927	0.0788	0.9714	42.268	142.007	184.275	0.1439	0.4771	0.6211	175.97	0.5990	8.2081	42									
43	0.058365	0.8955	0.0837	0.9792	43.275	150.475	193.749	0.1471	0.5041	0.6512	180.15	0.6122	8.6495	43									
44	0.061791	0.8983	0.0888	0.9872	44.282	159.417	203.699	0.1503	0.5325	0.6828	184.33	0.6254	9.1110	44									
45	0.065411	0.9012	0.0943	0.9955	45.289	168.874	214.164	0.1535	0.5624	0.7159	188.51	0.6386	9.5935	45									
46	0.069239	0.9040	0.1002	1.0042	46.296	178.882	225.179	0.1566	0.5940	0.7507	192.69	0.6517	10.0982	46									
47	0.073282	0.9069	0.1063	1.0132	47.304	189.455	236.759	0.1598	0.6273	0.7871	196.88	0.6648	10.6250	47									
48	0.077556	0.9097	0.1129	1.0226	48.311	200.644	248.955	0.1629	0.6624	0.8253	201.06	0.6778	11.1754	48									
49	0.082077	0.9125	0.1198	1.0323	49.319	212.485	261.803	0.1661	0.6994	0.8655	205.24	0.6908	11.7502	49									
50	0.086858	0.9154	0.1272	1.0425	50.326	225.019	275.345	0.1692	0.7385	0.9077	209.42	0.7038	12.3503	50									
51	0.091918	0.9182	0.1350	1.0532	51.334	238.290	289.624	0.1723	0.7798	0.9521	213.60	0.7167	12.9764	51									
52	0.097272	0.9211	0.1433	1.0643	52.341	252.340	304.682	0.1754	0.8234	0.9988	217.78	0.7296	13.6293	52									
53	0.102948	0.9239	0.1521	1.0760	53.349	267.247	320.596	0.1785	0.8695	1.0480	221.97	0.7424	14.3108	53									
54	0.108954	0.9267	0.1614	1.0882	54.357	283.031	337.388	0.1816	0.9182	1.0998	226.15	0.7552	15.0205	54									
55	0.115321	0.9296	0.1713	1.1009	55.365	299.772	355.137	0.1847	0.9698	1.1544	230.33	0.7680	15.7601	55									
56	0.122077	0.9324	0.1819	1.1143	56.373	317.549	373.922	0.1877	1.0243	1.2120	234.52	0.7807	16.5311	56									
57	0.129243	0.9353	0.1932	1.1284	57.381	336.417	393.798	0.1908	1.0820	1.2728	238.70	0.7934	17.3337	57									
58	0.136851	0.9381	0.2051	1.1432	58.389	356.461	414.850	0.1938	1.1432	1.3370	242.88	0.8061	18.1691	58									
59	0.144942	0.9409	0.2179	1.1588	59.397	377.788	437.185	0.1969	1.2081	1.4050	247.07	0.8187	19.0393	59									
60	0.15354	0.9438	0.2315	1.1752	60.405	400.458	460.863	0.1999	1.2769	1.4768	251.25	0.8313	19.9439	60									
61	0.16269	0.9466	0.2460	1.1926	61.413	424.624	486.036	0.2029	1.3500	1.5530	255.44	0.8438	20.8858	61									
62	0.17244	0.9494	0.2614	1.2109	62.421	450.377	512.798	0.2059	1.4278	1.6337	259.62	0.8563	21.8651	62									
63	0.18284	0.9523	0.2780	1.2303	63.429	477.837	541.266	0.2089	1.5104	1.7194	263.81	0.8688	22.8826	63									
64	0.19393	0.9551	0.2957	1.2508	64.438	507.177	571.615	0.2119	1.5985	1.8105	268.00	0.8812	23.9405	64									
65	0.20579	0.9580	0.3147	1.2726	65.446	538.548	603.995	0.2149	1.6925	1.9074	272.18	0.8936	25.0397	65									
66	0.21848	0.9608	0.3350	1.2958	66.455	572.116	638.571	0.2179	1.7927	2.0106	276.37	0.9060	26.1810	66									
67	0.23207	0.9636	0.3568	1.3204	67.463	608.103	675.566	0.2209	1.8999	2.1208	280.56	0.9183	27.3664	67									
68	0.24664	0.9665	0.3803	1.3467	68.472	646.724	715.196	0.2238	2.0147	2.2385	284.75	0.9306	28.5967	68									
69	0.26231	0.9693	0.4055	1.3749	69.481	688.261	757.742	0.2268	2.1378	2.3646	288.94	0.9429	29.8741	69									
70	0.27916	0.9721	0.4328	1.4049	70.489	732.959	803.448	0.2297	2.2699	2.4996	293.13	0.9551	31.1986	70									
71	0.29734	0.9750	0.4622	1.4372	71.498	781.208	852.706	0.2327	2.4122	2.6448	297.32	0.9673	32.5734	71									
72	0.31698	0.9778	0.4941	1.4719	72.507	833.335	905.842	0.2356	2.5655	2.8010	301.51	0.9794	33.9983	72									
73	0.33824	0.9807	0.5287	1.5093	73.516	889.807	963.323	0.2385	2.7311	2.9696	305.70	0.9916	35.4759	73									
74	0.36130	0.9835	0.5662	1.5497	74.525	951.077	1025.603	0.2414	2.9104	3.1518	309.89	1.0037	37.0063	74									
75	0.38641	0.9863	0.6072	1.5935	75.535	1017.841	1093.375	0.2443	3.1052	3.3496	314.08	1.0157	38.5940	75									
76	0.41377	0.9892	0.6519	1.6411	76.543	1090.628	1167.172	0.2472	3.3171	3.5644	318.28	1.0278	40.2369	76									
77	0.44372	0.9920	0.7010	1.6930	77.553	1170.328	1247.881	0.2501	3.5486	3.7987	322.47	1.0398	41.9388	77									
78	0.47663	0.9948	0.7550	1.7498	78.562	1257.921	1336.483	0.2530	3.8023	4.0553	326.67	1.0517	43.7020	78									
79	0.51284	0.9977	0.8145	1.8121	79.572	1354.347	1433.918	0.2559	4.0810	4.3368	330.86	1.0636	45.5248	79									
80	0.55295	1.0005	0.8805	1.8810	80.581	1461.200	1541.781	0.2587	4.3890	4.6477	335.06	1.0755	47.4135	80									
81	0.59751	1.0034	0.9539	1.9572	81.591	1579.961	1661.552	0.2616	4.7305	4.9921	339.25	1.0874	49.3670	81									
82	0.64724	1.0062	1.0360	2.0422	82.600	1712.547	1795.148	0.2644	5.1108	5.3753	343.45	1.0993	51.3860	82									
83	0.70311	1.0090	1.1283	2.1373	83.610	1861.548	1945.158	0.2673	5.5372	5.8045	347.65	1.1111	53.4746	83									
84	0.76624	1.0119	1.2328	2.2446	84.620	2029.983	2114.603	0.2701	6.0181	6.2882	351												