

DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DIDACTICA DE INTERCAMBIO TERMICO

**LUIS FERNANDO GARCÍA SÁNCHEZ
WILLIAM FERNANDO VALLEJO**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DIDACTICA DE INTERCAMBIO TERMICO

**LUIS FERNANDO GARCÍA SÁNCHEZ
WILLIAM FERNANDO VALLEJO**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Químico**

**Director:
FIDERMAN MACHUCA
Ingeniero Químico**

**Codirector:
JORGE MORENO
Ingeniero Industrial**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

Nota de aceptación

Evaluador

Evaluador

Santiago de Cali, 19 de Enero de 2012

*“No man lives or works alone, he is molded by those who share his life,
who make him what he truly is.”*

J.M. PRAUSNITZ

DEDICATORIA

*A Dios por ser el pilar de mi vida.
A mis padres,
Mariela y Luis Eduardo,
a quienes amo con toda mi alma.
A Sandra por estar a mi lado.*

Luis Fernando García Sánchez

*A Dios por darme fortaleza.
A mi madre y hermanos, por ser mis cimientos
A Carolina por darme todo su amor*

William Fernando Vallejo

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle y sus profesores, por las enseñanzas y conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra carrera, necesarios para ejercer nuestra profesión y desempeñarnos eficazmente en el ámbito laboral.

Al profesor Fiderman Machuca y Jorge Moreno, por aceptar la dirección de este proyecto, por su asesoría, colaboración y disposición durante todas las etapas de desarrollo del proyecto.

Gracias a nuestros compañeros Edwin y Camilo por su amistad y aportes durante la carrera, también a las personas que de una u otra forma han contribuido en nuestra formación como Ingenieros.

Al profesor Simon Reif, Jaime Jaramillo y los demás Profesores que me apoyaron y brindaron más que enseñanzas en la etapa más difícil de mi vida. W.Vallejo

RESUMEN

El proyecto “Diseño de una planta piloto didáctica de intercambio térmico”, se llevo a cabo con el objetivo de contribuir a la satisfacción de las necesidades prácticas en la formación superior, en cuanto al contacto real con el proceso de transferencia de calor en la industria, facilitando así la adquisición de conocimientos y competencias laborales vitales en un país en vía de desarrollo.

En este trabajo se diseñó una planta piloto didáctica de intercambio térmico, donde el corazón del proyecto es un intercambiador de calor de tubos y coraza, también hacen parte de la planta un equipo de enfriamiento, un calentador a gas que proporciona la energía necesaria para calentar el fluido energético, una serie de bombas para movilizar los fluidos a través de tuberías, tanques donde se almacenan los fluidos y un equipo que permite adecuar el agua para el proceso.

Para el diseño de los equipos se tuvo en cuenta inicialmente las condiciones de operación de la planta piloto de intercambio térmico existente en el SENA (sede Salomia, Cali), estos valores se adecuaron posteriormente según criterios técnicos y de seguridad, que permitieran un amplio rango de operación.

Para el diseño de equipos y calculo de tuberías se utilizaron herramientas computacionales como el software HTRI (Heat Transfer Research Inc) Xchanger Suite 5 y Aspen plus, a su vez, se realizaron cálculos técnicos manuales para estimar la capacidad y diseño de la torre de enfriamiento. Por razones de seguridad se propone el uso de un calentador de agua, en lugar de los típicos calderínes, este fue seleccionado de acuerdo a la información técnica suministrada por proveedores.

Finalmente se elaboraron los diagramas en 2D y 3D de la planta, al igual que el diagrama P&ID. El área calculada de la planta fue 65 m², por lo que puede adecuarse fácilmente a cualquier espacio en un aula de clase. Los materiales de los equipos son de fácil adquisición, pueden construirse y montarse por mano de obra colombiana, el costo de los equipos de la planta asciende a \$ 183.000.000.00 aproximadamente.

Palabras claves: *Planta piloto, Intercambio de calor, diagrama P&ID.*

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Tratamiento de Aguas	5
2.2 Calentador de agua	6
2.3 Intercambiador de Calor	7
2.4 Torre de enfriamiento	8
2.5 Tanques de almacenamiento	10
2.6 Bombas	10
2.7 Control automático de procesos	11
3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS	14
3.1 Tratamiento de agua.....	14
3.2 Calentador de agua	16
3.3 Intercambiador de calor	17
3.4 Torre de enfriamiento	19
3.5 Tanques de almacenamiento	28
3.6 Instrumentación industrial.....	29
3.7 Distribución de la planta	30
3.8 Diagramas de instrumentación y tubería	31
3.9 Calculo de tuberías y selección de bombas	31
3.10 Costo aproximado por equipos.....	32
3.11 Manual de operación de la planta de intercambio térmico	33
4. CONCLUSIONES.....	35
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ANEXOS.....	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información técnica del calentador a gas BOSCH Therm 8000s.	17
Tabla 2. Parámetros de diseño y resultados arrojados por el software HTRI para el diseño del intercambiador de calor	18
Tabla 3. Constantes de la ecuación 4.4.6 para los diferentes entramados.	23
Tabla 4. Altura de la sección empacada para los diferentes tipos de entramado. ...	24
Tabla 5. Área transversal y ancho de la torre de enfriamiento para los diferentes tipos de entramado.	24
Tabla 6. Parámetros para las ecuaciones 4.4.7 y 4.4.8.	25
Tabla 7. Caídas de presión en la torre de enfriamiento.	26
Tabla 8. Instrumentación seleccionada para la planta.	29
Tabla 9. Escenarios de bombeo para el dimensionamiento de tuberías.	31
Tabla 10. Diámetros mínimos de tubería permisibles a velocidades máximas.	31
Tabla 11. Caídas de presión a diferentes diámetros de tubería (psi/100 ft).	32
Tabla 12. Bombas seleccionadas para los circuitos de bombeo.	32
Tabla 13. Costo por equipos.	33
Tabla 14. Costos de accesorios e instrumentación.	33

LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 1. Flujo de Aire vs Diámetro del Ventilador para una caída de presión de 0.185 in H ₂ O.	27
Grafico 2. Flujo de Aire vs Velocidad del Ventilador para una caída de presión de 0.185 in H ₂ O.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama simplificado del proceso de intercambio térmico.....	5
Figura 2. Intercambiador de tubo y coraza.	7
Figura 3. Diagrama de una torre de enfriamiento de tiro inducido mecánicamente..	9
Figura 4. Clasificación de los tipos de bombas.....	11
Figura 5. Calentador BOSCH Therm 8000s	16
Figura 6. Representación en 3D del intercambiador de calor de tubos y coraza	19
Figura 7. Esquema de recirculación de la torre de enfriamiento.....	20
Figura 8. Diagrama de las diferentes configuraciones de entramados de listones.	21
Figura 9. Diagrama simplificado del proceso de enfriamiento en la torre.	22
Figura 10. Diagrama de equilibrio y líneas de operación de humidificación.	22
Figura 11. Diagrama estructural de la pileta de la torre de enfriamiento.	28

INTRODUCCIÓN

Con el incremento en las competencias laborales requeridas en el personal que ingresa a las industrias hoy en día, se deben ampliar las habilidades a desarrollar en los técnicos, tecnólogos y profesionales que se forman en las instituciones educativas para que puedan llegar a competir con profesionales de diferentes partes del mundo. Por esta razón, es necesario que los estudiantes conozcan el funcionamiento real de los diferentes equipos que se pueden encontrar en una planta de procesos de transformación física o química de materias primas. Es aquí donde entran a formar parte las plantas didácticas a escala piloto, pues permiten interactuar y entender las funciones de los diferentes dispositivos utilizados para el control de procesos, así como su reacción a cambios en los mismos. Un ejemplo de estas es la planta piloto de producción de biodiesel ubicada en el Centro de Biotecnología Industrial del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) sede Palmira, la planta piloto de extracción de aceites esenciales del SENA sede Buga y la planta piloto de intercambio térmico del SENA sede Cali.

Estos desarrollos tecnológicos crean ambientes de aprendizaje que permiten desarrollar actividades a escala piloto, en donde el alumno se enfrenta al proceso real, con las situaciones características que ello implica; dichos ambientes de aprendizaje forman al individuo técnicamente y brindan la posibilidad de adquirir capacidades profesionales para desempeñar su trabajo en la industria de forma eficaz.

Aunque dichas plantas piloto se utilicen para el aprendizaje, es necesario que cumplan con normas y estándares tanto de diseño como de proceso, lo cual permite replicar de una mejor forma el proceso industrial.

Dado que la temperatura es una de las variables que comúnmente se debe controlar en la mayoría de los procesos industriales y que los intercambiadores de calor son los equipos más usados para el intercambio térmico, se evidencia la importancia de diseñar una **planta didáctica de intercambio térmico a escala piloto**, la cual resultaría clave en el proceso de formación y estudios específicos que brindan las instituciones de educación superior; que además de cumplir con los estándares de seguridad requeridos actualmente, resulte de fácil construcción y permita su reproducción a nivel nacional para abarcar y beneficiar la mayor cantidad de personas en el país.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

- Diseñar a escala piloto una **planta didáctica de intercambio térmico**.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar los equipos necesarios que hacen parte de una planta piloto didáctica de intercambio térmico.
- Diseñar (teniendo en cuenta normas y estándares) los equipos, tuberías y accesorios de la planta.
- Elaborar el diagrama de instrumentación y tubería (P&ID) de la planta.
- Elaborar planos 2D y 3D proponiendo la distribución espacial y el diagrama de elevación de la planta.
- Elaborar un manual de operación de la planta.

2. MARCO TEÓRICO

Una **planta piloto** es una planta de procesos a escala reducida, cuyo objetivo es obtener información sobre un determinado proceso físico, químico, bioquímico, etc., que permita determinar si este es técnica y económicamente viable, establecer los parámetros óptimos de operación, parámetros de diseño, materiales de construcción de los equipos, operaciones unitarias, determinación de impurezas, desgaste de equipos, procedimientos operativos, problemas operativos, problemas ambientales, etc., lo cual posibilita el posterior diseño, construcción u optimización de la planta a escala industrial (1).

Una planta piloto es una pieza fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías pues al realizar estudios en ella se adquiere conocimientos y criterios técnicos que permiten obtener avances en la optimización, control, seguridad, rentabilidad, etc., de procesos, equipos y energías productivas. La planta piloto permite experimentar de forma económica y eficaz con el comportamiento de un proceso a ciertas condiciones, que de llevarse a cabo en plantas industriales, podría llevar a altas pérdidas en el proceso e incluso a condiciones no seguras para los trabajadores.

Cuando se experimenta algún proceso a escala, se pueden llevar a cabo prácticas interdisciplinarias que en el ámbito pedagógico propician la interactividad de los alumnos y maestros con el proceso. Esta interacción (simulación de trabajo) provoca cambios positivos en los usuarios y les permite desarrollar habilidades tales como:

- Toma de decisiones.
- Trabajo en equipo.
- Manejo y manipulación de variables.
- Comprensión de procesos.
- Resolución de problemas.
- Pro-actividad.
- Control de tiempos.
- Interdisciplinariedad.
- Creatividad.

Una planta piloto debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial generalmente opera a las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, concentración, etc., de manera que se puedan

realizar experimentos o ensayos con distintos valores de las variables de proceso y poder determinar así los valores óptimos.

Aunque en los últimos años se han desarrollado diversas herramientas para simulación de procesos por ordenador, estos sistemas no pueden sustituir las plantas piloto, ya que no son capaces de predecir el comportamiento de nuevos procesos (de los cuales no hay datos disponibles), ni de procesos complejos (2).

Como parte de los programas de adecuación y mejoramiento de los ambientes de aprendizaje, promovidos por la Dirección General del SENA, la Unidad de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico (UIVADT) del Centro de Electricidad y Automatización Industrial desarrolló un nuevo proyecto de Diseño y Fabricación de una Planta de Intercambio Térmico, como un ambiente educativo para aprendices, estudiantes, investigadores y trabajadores del SENA, este nuevo ambiente está formado por la Planta de Intercambio Térmico (PIT 000) que contiene diversos componentes didácticos, técnicos y tecnológicos de gran complejidad (3).

En el presente trabajo se diseña a escala piloto una planta de intercambio térmico, la cual consiste en un circuito cerrado de agua fría y caliente. El fluido usado en el proceso se toma de la red de acueducto de agua potable, posteriormente se filtra, con el objetivo de retirar los sólidos suspendidos que se puedan encontrar en él, este pasa a través de una resina de intercambio catiónico, en donde se retiran los iones de calcio y magnesio que pueda traer, evitando así el incrustamiento de los equipos, ya que estos iones son los causantes de la dureza del agua. Esta agua es utilizada para alimentar los circuitos de agua caliente (fluido energético) y fría (fluido de proceso) de la planta.

El agua fría inicia el ciclo en un tanque de almacenamiento, luego pasa por un intercambiador de calor en donde recibe energía del fluido que se encuentra a una mayor temperatura, posteriormente pasa a una torre de enfriamiento donde disminuye la temperatura aproximadamente al valor inicial, finalmente, se almacena en el tanque de agua fría. El fluido energético se toma de otro tanque de almacenamiento, seguidamente pasa por un calentador de agua a gas, en donde aumenta su energía, incrementando así su temperatura, sin alcanzar el punto de ebullición, posteriormente pasa al intercambiador de calor, en donde a través de las paredes de este, interactúa con el fluido frío haciendo que se incremente la temperatura del este último, finalmente se almacena en el tanque de agua caliente. El esquema del proceso se muestra en la Figura 1.

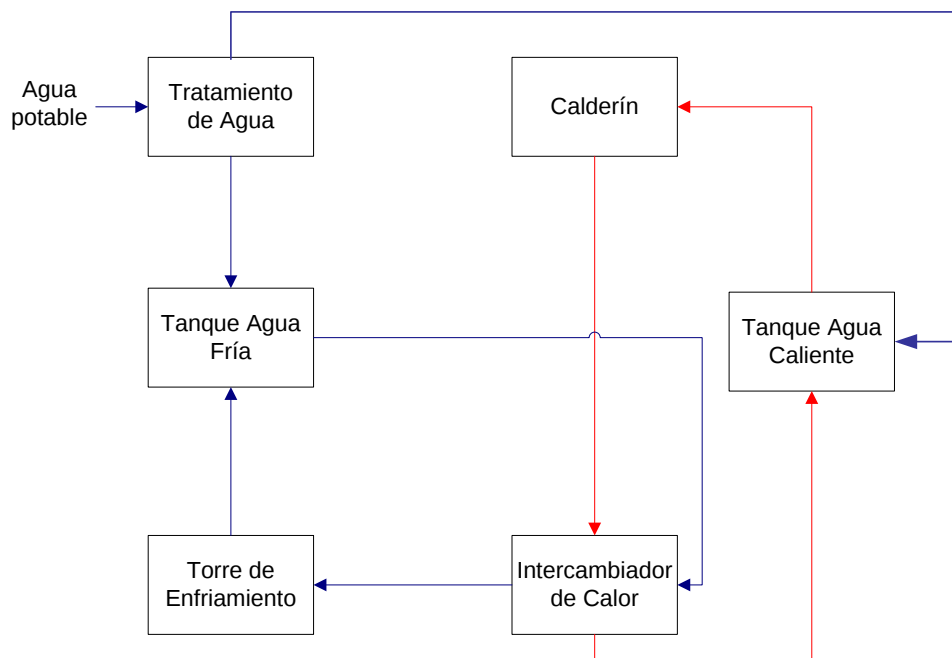


Figura 1. Diagrama simplificado del proceso de intercambio térmico.

2.1 Tratamiento de Aguas

El agua que se usa en equipos de transferencia de calor como calderas, calderines, evaporadores, intercambiadores, etc., debe encontrarse libre de elementos que puedan perjudicar el proceso de intercambio, uno de estos son los iones de magnesio y calcio, los cuales al convertirse en sales generan obstrucciones y depósitos sobre las paredes internas de los equipos, reduciendo considerablemente la eficiencia de la transferencia de calor o restringiendo el paso del fluido.

Para retirar estos elementos se utilizan resinas de intercambio catiónico, comúnmente llamadas suavizadores, las cuales son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, en forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo o en forma de polvo. Están compuestas de una alta concentración de grupos polares ácidos, incorporados a una matriz de un polímero sintético (resinas estirénicas, resinas acrílicas, etc.), actúan tomando los iones del agua y ceden

cantidades equivalentes de otros iones, en este caso sodio, ya que la resina utilizada es una resina catiónica de ácido fuerte.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contienen el ión móvil original, como sodio en este caso, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento, para la regeneración de la resina este diseño considera la sal común.

Además de la dureza también es recomendable eliminar otras impurezas, como sólidos disueltos u otras materias orgánicas. Para esto se utilizan lechos de arena, carbón activado o filtros fabricados con polímeros, como polipropileno, los cuales retienen tales impurezas. Esta etapa se realiza antes de pasar el agua por el suavizador.

2.2 Calentador de agua

En la industria el tratamiento térmico para los fluidos de calentamiento es llevado a cabo en calderas, calderines, intercambiadores de calor, calentadores a gas, etc; La elección de uno u otro dispositivo depende en su gran mayoría de las características que debe cumplir este (temperatura y presión).

Un calentador es un dispositivo que utiliza energía para elevar la temperatura de un fluido. A nivel industrial los usos son muy variados tanto para el agua caliente como para el vapor de agua.

Entre los combustibles utilizados se encuentra el gas natural, gas propano (GLP), querosén, carbón y electricidad. Alternativamente también se emplea la energía solar, bombas de calor (compresor) de refrigeradores o de acondicionadores de aire, calor reciclado de aguas residuales de proceso (no aguas negras). En el caso de las aguas calentadas con energías alternativas o recicladas, éstas usualmente se combinan con energías tradicionales.

Los tipos de calentadores de agua más conocidos son:

- Calentadores Eléctricos
- Calentadores de Gas

- Calentadores de depósito
- Calentadores de paso o instantáneos
- Calentadores solares

2.3 Intercambiador de Calor

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida, ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería. El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio se denomina intercambiador de calor, las aplicaciones específicas se pueden encontrar en calefacción de locales y acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desecho y algunos procesamiento químicos (4).

Normalmente los intercambiadores de calor se clasifican de acuerdo con el arreglo del flujo y el tipo de construcción, hay diversos tipos de intercambiadores de calor por ejemplo los intercambiadores compactos, de flujo cruzado, entre otros; un tipo de intercambiador muy común en las plantas químicas es el intercambiador de calor de tubos y coraza (ver Figura 2).

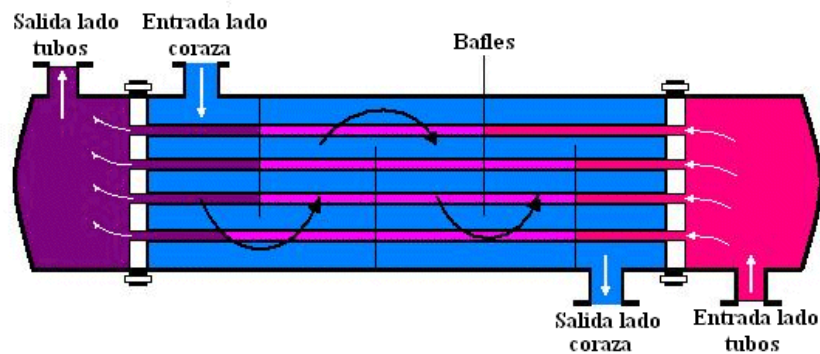


Figura 2. Intercambiador de tubo y coraza.

Los intercambiadores de tubos y coraza se usan para servicios en los que se requieren grandes superficies de intercambio, generalmente asociadas a caudales mucho mayores de los que puede manejar un intercambiador de tubos concéntricos. En efecto, el intercambiador de tubos concéntricos requiere una gran cantidad de horquillas para manejar servicios como por ejemplo el descrito anteriormente, pero a expensas de un considerable consumo de espacio, y con aumento de la cantidad de uniones que son puntos débiles pues en estas la posibilidad de fugas es mayor.

La solución consiste en ubicar los tubos en un haz, rodeados por un tubo de gran diámetro denominado coraza. De este modo los puntos débiles donde se pueden producir fugas, en las uniones del extremo de los tubos con la placa, están contenidos en la coraza. En cambio en un conjunto de horquillas estos puntos están al aire libre.

Existen tres tipos básicos de intercambiadores de haz de tubos y coraza. Dentro de cada uno de ellos hay numerosos subtipos diseñados para circunstancias de operación específicas. Los tres tipos básicos son:

- Tubos en U
- Cabezal flotante
- Cabezal fijo

El diseño final del equipo para transmisión de calor es casi siempre un compromiso, basado en el criterio de ingeniería y los requerimientos del servicio, que trata de conseguir la mejor operación global. Algunas veces el diseño está condicionado por consideraciones que tienen poco que ver con la transmisión de calor, como puede ser el espacio disponible para la instalación del equipo o la caída de presión tolerable en las corrientes de los fluidos. Los intercambiadores tubulares se diseñan de acuerdo con diversas normas y códigos, tales como los estándares de la TEMA y el “Unfired Pressure Vessel Code” de la ASME y del API (5).

2.4 Torre de enfriamiento

Una parte importante en la integración energética y optimización de recursos en las plantas industriales, son los equipos que permiten reutilizar fluidos que contienen energía útil para que puedan ser usados en el propósito original o en otras aplicaciones posibles. Un caso particular de estos equipos, son las torres de enfriamiento, en las cuales es posible acondicionar las aguas que han sido usadas en procesos de intercambio térmico para alcanzar temperaturas lo suficientemente bajas para ser usadas nuevamente en los procesos de la planta.

El principio de operación de las torres de enfriamiento se fundamenta en la disminución de la temperatura que experimenta el agua cuando se evapora una pequeña cantidad de ella y pasa a formar parte del aire circundante, es decir, cuando una gota de agua se pone en contacto con el aire se produce la evaporación de la película exterior de la gota, requiriéndose para este proceso la

absorción de calor. La evaporación consume aproximadamente el 1% del caudal total de agua por cada 7 °C de disminución de su temperatura. El calor requerido para la evaporación se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente. Por tanto, el enfriamiento se realiza tanto por transferencia de calor sensible (cambio de temperatura) como de calor latente (cambio de estado físico).

De todo el calor transferido del agua al aire, el calor latente de vaporización representa frecuentemente más del 90%, correspondiendo tan sólo un 10% al calor sensible de disminución de la temperatura del agua. La capacidad de enfriamiento de la torre es directamente proporcional a la superficie de contacto aire-agua y al tiempo de contacto.

Los diferentes tipos de torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo al modo en que se introduce o fluye el gas de intercambio, los principales tipos son de circulación natural atmosféricas o de tiro natural, de tiro mecánico forzado o inducido (6); esta última es la más usada en las plantas industriales debido a su pequeño tamaño y eliminación de algunos problemas comunes de operación como la canalización (ver Figura 3).

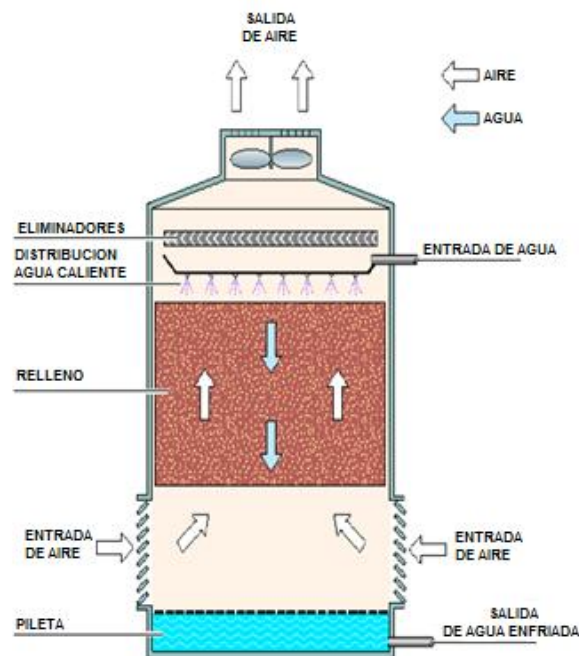


Figura 3. Diagrama de una torre de enfriamiento de tiro inducido mecánicamente.

2.5 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o comercialización. Los tanques de almacenamiento, se clasifican en:

- Cilíndricos horizontales.
- Cilíndricos verticales de fondo plano.

Los tanques cilíndricos horizontales, generalmente son de volúmenes relativamente bajos, debido a que presentan problemas por fallas de corte y flexión, por lo general, se usan para almacenar volúmenes pequeños. Los tanques cilíndricos verticales de fondo plano nos permiten almacenar grandes cantidades volumétricas con un costo bajo, con la limitante que solo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas.

En USA y en muchos otros países del mundo, incluyendo Colombia, el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, se basa en la publicación que realiza el Instituto Americano del Petróleo, al que esta institución designa como "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica, esta sólo aplica para aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, concreto, asfalto, etc., diseñados para soportar una presión de operación atmosférica y una temperatura de operación no mayor de 93 °C (200 °F), que no se usen para servicios de refrigeración (7).

2.6 Bombas

En todas las plantas industriales existe la necesidad de transportar los materiales o fluidos de un punto del proceso a otro, ya sea por tuberías, ductos, bandas, recipientes, etc. El flujo de un fluido a través de un ducto o canal se logra transfiriendo una cantidad de movimiento, mediante dispositivos físicos o mecánicos. Los medios comúnmente empleados para lograr esta transferencia son: gravedad, desplazamiento, fuerza centrífuga, fuerza electromagnética, impulso mecánico, o combinaciones de estos cinco medios básicos. Después de la gravedad, el medio más empleado actualmente es la fuerza centrífuga (8).

Un resumen de los diferentes tipos de bombas que se encuentran en el mercado se muestra en la Figura 4 (9), siendo las de tipo centrifuga las más utilizadas debido a su gran versatilidad, estas constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, puesto que es la más adecuada para mover más

cantidad de líquido en comparación a una bomba de desplazamiento positivo. Las más comunes son las que están construidas bajo normativa DIN 24255 (en formas e hidráulica) con un único rodete, que abarcan capacidades hasta los 500 m³/h y alturas manométricas hasta de 100 metros con motores eléctricos de velocidad normalizada.

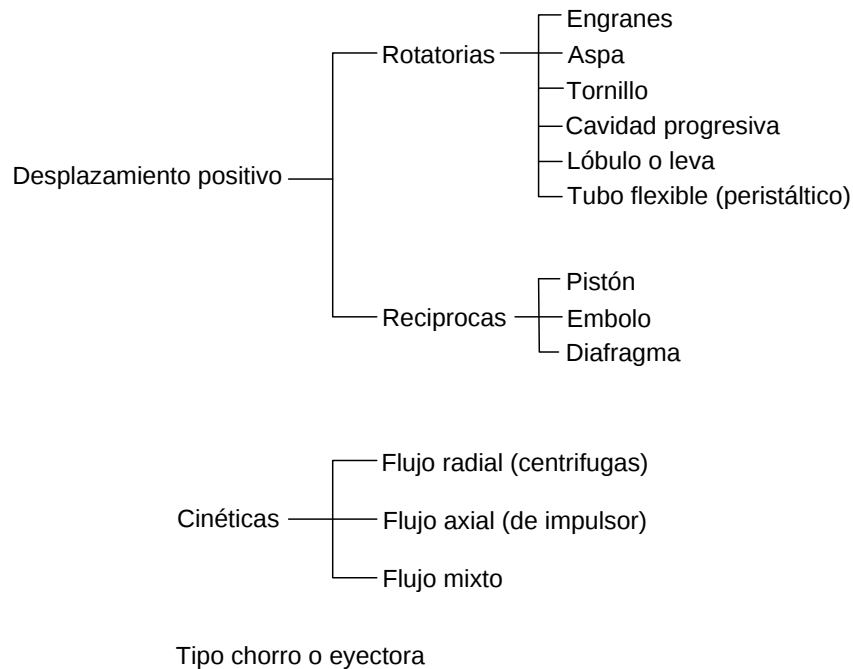


Figura 4. Clasificación de los tipos de bombas.

2.7 Control automático de procesos

Con el paso de los años, la industria en general ha alcanzado un alto desarrollo en el campo de la automatización. Este proceso ha sido impulsado por un mayor nivel de competitividad del mercado que ha obligado a las empresas a buscar mecanismos para disminuir costos, a la vez aumentar la calidad y mejorar la organización global de la producción para responder a la demanda. Sin embargo, el principal objetivo de la automatización (producir el mejor producto al menor costo) exige que las distintas secciones de una planta trabajen juntas como si fuesen una sola entidad, cumpliendo así la razón de la instrumentación y el control de procesos que es suplir la necesidad de: optimizar los recursos humanos, materias primas, productos finales, producir productos competitivos con un alto rendimiento, producir productos con características repetitivas, fomentar el ahorro energético y fomentar la conservación del medio ambiente.

El control automático a diferencia del manual, se basa en dispositivos y equipos que conforman un conjunto capaz de tomar decisiones sobre los cambios o ajustes necesarios en un proceso para conseguir los mismos objetivos que en el control manual pero con muchas ventajas adicionales como las ya mencionadas. Adicionalmente a esto, existen una serie de elementos o componentes que pueden integrarse a este conjunto para lograr cumplir con varias funciones, algo que sería imposible de ser logrado por un operador con la precisión y eficiencia deseada (10).

Los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son:

- Sensor: que también se conoce como elemento primario, cuya función es detectar la magnitud de la variable a medir.
- Transmisor: dispositivo encargado de entregar una señal de tipo eléctrico de forma proporcional a la recibida por parte del sensor.
- Controlador: es el elemento del sistema de control que procesa la señal de la variable medida y toma la decisión adecuada para el proceso.
- Elemento final de control: frecuentemente se trata de una válvula de control aunque no siempre. Otros elementos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

La importancia de estos componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, estas operaciones son:

- Medición: la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
- Decisión: con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
- Acción: como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente ésta es realizada por el elemento final de control.

Para un adecuado funcionamiento de la planta piloto en algunos de los equipos se deben implementar lazos de control para las variables de nivel, temperatura, flujo volumétrico y másico; hoy en día la instrumentación relacionada con estas variables presenta diversos principios de medición, algunos más complejos que otros, entre los cuales se encuentran:

- Nivel: presión diferencial, ultrasónico, radar y capacitivo.
- Temperatura: efectos termoelectricos (dispositivo térmico resistivo y termocuplas)

- Flujo volumétrico: presión diferencial, inducción electromagnética y vortex
- Flujo másico: coriolis y deriva térmica.

3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

El diseño de equipos que se sigue en el presente trabajo está constituido por 5 etapas básicas, que se describen a continuación:

- a. Definir el objetivo del equipo o la etapa.
- b. Recolección de variables de entrada al diseño: flujos y propiedades de la entrada, condiciones de operación del equipo, requerimientos del proceso en la salida del equipo, etc.
- c. Parámetros fijos de diseño: se definen los valores a establecer por el diseñador para algunos parámetros fijos del diseño.
- d. Cálculos y diseño básico de los equipos: cálculo de flujos faltantes, estimación de características básicas del equipo, etc.
- e. Cálculos y diseño detallado de los equipos: dimensionamiento de partes del equipo, selección de materiales, características hidráulicas de los equipos, etc.

En caso de obtenerse características no permitidas o fuera de rango en las dimensiones, es necesario volver al literal C y cambiar el valor de los parámetros fijos.

- f. Generación de planos estructurales: dimensiones detalladas, ubicación de partes, etc.

Ver diagrama P&ID (Anexo A.1.) para observar los diferentes equipos que conforman la planta de intercambio térmico.

3.1 Tratamiento de agua

El objetivo de este sistema es tomar agua de la red del acueducto y retirar los elementos perjudiciales para los equipos de la planta, como por ejemplo los sólidos suspendidos, durezas, etc.

Las características del agua de entrada, según la norma NTC 813 para la calidad del agua en Colombia, no debe tener una concentración de durezas mayor a 150

mg/L medidas como CaCO_3 . Este valor de concentración máxima se debe pasar a granos/galón (gpg):

$$(150 \text{ ppm}) / (17.1 \text{ ppm/gpg}) = 8.7719 \text{ gpg}$$

Teniendo en cuenta que el flujo que provee la red de acueducto es aproximadamente 15 L/min y proyectando que la planta operara 4 h/día, se necesitaría tratar 7608 gal/día, con lo que se tendrían que retirar 66737 granos/día.

Para obtener la cantidad de resina, es necesario definir cuanta sal será utilizada para regenerar la resina, como se había mencionado. Si la regeneración se hace con 15 lb sal/ft³ de resina, entonces se obtendrá mayor capacidad de resina, pero un mayor consumo de sal. Por el contrario, si se regenera con 5 lb sal/ft³ de resina se obtendría menor capacidad de resina pero un ahorro de sal.

En este diseño se opta por tener mayor capacidad de tratamiento, por lo que cada pie cubico de resina es capaz de retirar 30000 granos/15 lb sal (11). Con esto se necesitarían aproximadamente 2.5 ft³ de resina.

Para evitar canalizaciones a través de la resina, el flujo mínimo de servicio para el suavizador es 0.3 gpm/ft² de tanque (11). Para este cálculo se establece un valor de 6 gpm/ft², con lo que se tendría un diámetro del tanque de 1 ft y una altura de 4 ft.

Para el cálculo del sistema de filtrado, el flujo a tratar se divide entre 12.5 gpm/ft² para calcular el área del lecho filtrante, en este caso sería 0.32 ft². Con esta área es posible determinar el volumen del filtro multicama (12), que para este sistema es 0.66 ft³. El volumen calculado es equivalente a un cartucho 100 % de polipropileno de 4.5 pulgadas de diámetro y 20 pulgadas de largo, con una porosidad de 25 micrones y capacidad de filtración de 70 L/min, usado en aplicaciones de mediana escala, considerando que el agua potable ha tenido un tratamiento previo en la planta de suministro local.

3.2 Calentador de agua

Debido a la complejidad en el diseño, construcción y operación de una caldera, se optó por utilizar un calentador a gas, para incrementar la energía del fluido de calentamiento a las condiciones necesarias, más aún cuando la temperatura de este solo se elevará a 90°C sin alcanzar el punto de ebullición, para ello se realizaron una serie de consultas a proveedores como Colmáquinas, VR Ingeniería, Districalders S.A.S., de donde se concluyó que para satisfacer la necesidad de la planta el equipo más apto es el calentador Therm 8000s de BOSCH (ver Figura 5), los planos del calentador se presentan en el anexo A.2, la información adicional se presenta en el anexo A.3.

Con una potencia por unidades de 525 Kw tiene capacidad para un muy eficiente abastecimiento, adicionalmente se pueden satisfacer fácilmente los requerimientos más complejos que antes solo se podían compensar con altos costos o sacrificando calidad por el tiempo de duración. Con este equipo se obtienen los siguientes beneficios:

- Es más compacto por Kw ofrecido.
- Potencia total modulable del 10% de la primera unidad hasta el 100% de todas las unidades.
- Para trabajo pesado con intercambiador en cobre hecho para trabajar con agua de entrada precalentada.
- Perfecto para recirculación.
- Eficiencia del 100%, tecnología de condensación.



Figura 5. Calentador BOSCH Therm 8000s

La información técnica del equipo es presentada a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1. Información técnica del calentador a gas BOSCH Therm 8000s.

Especificaciones	
Capacidad	Hasta 30 L / min
Potencia (a 2600 Mts SNM)	6.0 a 40.0 kW
Potencia (a 0 Mts SNM)	6.0 a 52.5 kW
Eficiencia	96%
Consumo Gas natural	0.93 a 5.5 m ³ /h y 0.55 a 4.13 m ³ /h
Consumo Gas propano	0.23 a 1.8 kg/h y 0.14 a 1.3 kg/h
Consumo eléctrico	112 W (max)/7.1 W (Stand by)
Presión de agua	0.3 a 12.0 bar
Caudal de agua	1.9 a 30 L/min
Temperatura de agua	38 a 80°C
Altura	775 mm
Ancho	452 mm
Profundidad	285 mm
Peso	34 kg
Niveles de sonido	45 - 65 db (A)

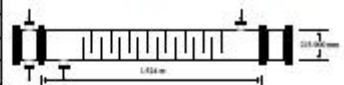
3.3 Intercambiador de calor

Para el diseño del intercambiado de calor se utiliza el software HTRI Xchanger Suite[®], el cual se seleccionó de entre otros software debido a que permite simular y diseñar virtualmente cualquier tipo de intercambiador de calor de tubos y coraza, calderas, condensadores de reflujo, evaporadores de película descendente entre otros, incluye soporte según los estándares de TEMA e integra cálculos de vibración, además, posee una interfaz gráfica que permite un fácil acceso para el usuario.

Como punto de partida para el diseño se utilizaron los valores de temperaturas y caudales que generalmente se pueden manejar en la planta piloto de intercambio térmico del SENA sede Cali, estos valores se refinaron de acuerdo a reglas heurísticas que se encuentran en la literatura (13); la geometría del intercambiador se selecciono teniendo en cuenta que el tipo tubo y coraza de 2 pasos por tubos y uno por coraza es el más común en la industria, detalles como el tipo de cabezales se eligieron teniendo en cuenta las presiones que se presentaran dentro del intercambiador, al igual que la economía en su construcción, otros valores como por ejemplo el fouling se selecciono de la literatura (14).

Para el diseño se asumió que la superficie externa de la coraza es adiabática, es decir no existe transferencia de calor con el ambiente que rodea el intercambiador, los parámetros ingresados y resultados del diseño se muestran a continuación en la Tabla 2, la cual es generada por el software.

Tabla 2. Parámetros de diseño y resultados arrojados por el software HTRI para el diseño del intercambiador de calor (observe que los valores tienen unidades SI)

HTRI		HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET				Page 21
						SI Units
Service of Unit		Item No.				
Type	AEL	Orientation	Horizontal	Connected In	1 Parallel 1 Series	
Surf/Unit (Gross/Eff)	5.47 / 5.32 m ²	Shell/Unit	1	Surf/Shell (Gross/Eff)	5.47 / 5.32 m ²	
PERFORMANCE OF ONE UNIT						
Fluid Allocation		Shell Side		Tube Side		
Fluid Name						
Fluid Quantity, Total	kg/s	0.4158		0.2520		
Vapor (In/Out)	wt%	0.0		0.0		
Liquid	wt%	100.0		100.0		
Temperature (In/Out)	C	30.00		90.00		
Density	kg/m ³	55.267		53.585		
Viscosity	mN-s/m ²	0.7977		0.3144		
Specific Heat	kJ/kg-C	4.1836		4.2050		
Thermal Conductivity	W/m-C	0.6150		0.6744		
Critical Pressure	kPa					
Inlet Pressure	kPa					
Velocity	m/s			1.12		
Pressure Drop, Allow/Calc	kPa			5.020		
Average Film Coefficient	W/m ² -K	1749.53		555.77		
Fouling Resistance (min)	m ² -K/W	0.000088		0.000088		
Heat Exchanged	0.0393 MegaWatts	MTD (Corrected)	27.3 C	Overdesign 10.92 %		
Transfer Rate, Service	270.80 W/m ² -K	Calculated	300.36 W/m ² -K	Clean 320.28 W/m ² -K		
CONSTRUCTION OF ONE SHELL				Sketch (Bundle/Nozzle Orientation)		
		Shell Side	Tube Side			
Design Pressure	kPaG	275.794	275.794			
Design Temperature	C					
No Passes per Shell		1	2			
Flow Direction		Downward	Downward			
Connections	In mm	1 @ 52.553	1 @ 52.553			
Size & Rating	Out mm	1 @ 52.553	1 @ 52.553			
	Liq. Out mm	@	@			
Tube No.	90 OD 12.700 mm	Thk(Avg)	1.651 mm	Length	1.524 m	Pitch 17.462 mm Layout 60
Tube Type	Plain	Material	304 STAINLESS STEEL (18 CR, 8 NI)	Pairs seal strips	2	
Shell ID	215.900 mm	Kettle ID	mm	Passlane Seal Rod No.	0	
Cross Baffle Type	PERPEND. SINGLE-SEG.	%Cut (Diam)	25.0	Impingement Plate	None	
Spacing(c/c)	63.500 mm	Inlet	264.141 mm	No. of Crosspasses	17	
Rho-V2-Inlet Nozzle	664.87 kg/m-s ²	Shell Entrance	748.98	Shell Exit	758.46 kg/m-s ²	
		Bundle Entrance	45.00	Bundle Exit	45.57 kg/m-s ²	
Weight/Shell	321.42	Filled with Water	386.38	Bundle	81.15 kg	
Notes:		Thermal Resistance, %		Velocities, m/s	Flow Fractions	
		Shell	17.15	Shellside	1.12	A 0.161
		Tube	73.05	Tubeside	1.49	B 0.501
		Fouling	6.21	Crossflow	1.69	C 0.077
		Metal	3.58	Window	1.41	E 0.261
						F 0.000

Los planos del intercambiador pueden examinarse en detalle en el anexo A.4, a continuación se presenta un esquema en 3D de cómo debe ser el intercambiador según los resultados presentados en la Tabla 2, ver Figura 6.

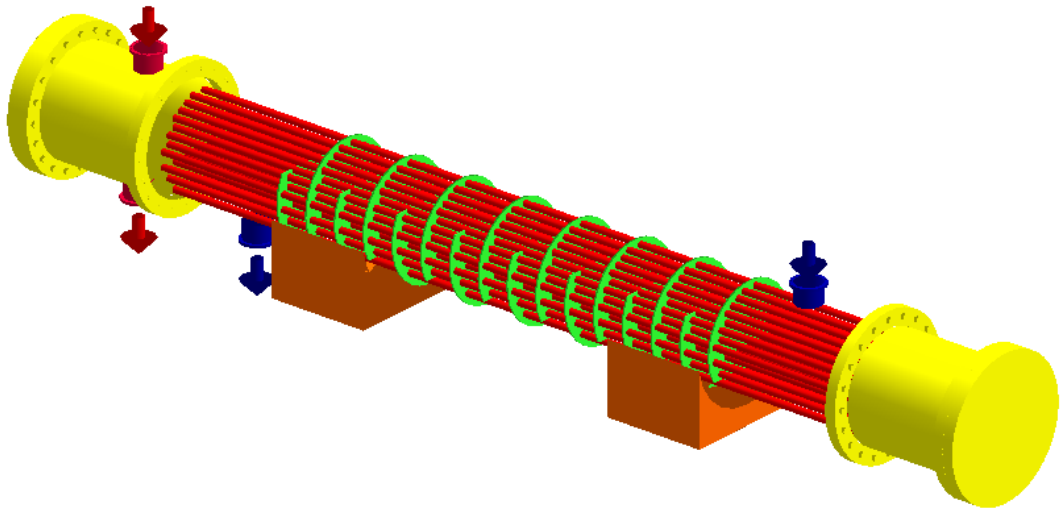


Figura 6. Representación en 3D del intercambiador de calor de tubos y coraza (note que se muestra el intercambiador sin la coraza)

3.4 Torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento se diseña debido a la necesidad de disminuir la temperatura del agua de proceso a 30°C aproximadamente, ya que una vez esta pasa por el intercambiador de calor aumenta su temperatura a un valor que depende de las condiciones en que este opera, el valor máximo será 90 °C.

Para optimizar el diseño de la torre de enfriamiento, es recomendable recircular parte del fluido que sale de ella frío y mezclarlo con el flujo de entrada. El flujo a recircular puede ser determinado realizando un balance de masa y energía sobre la torre, definiendo la temperatura del agua de entrada.

Balance de masa y energía:

$$m_1 + m_2 = m_3 \quad (3.4.1)$$

$$H_1 + H_2 = H_3$$

$$m_1Cp_1(T_1-T_0)+m_2Cp_2(T_2-T_0)=m_3Cp_3(T_L-T_0) \quad (3.4.2)$$

Reemplazando (3.4.1) en (3.4.2)

$$m_1Cp_1(T_1-T_0)+m_2Cp_2(T_2-T_0)=(m_1+m_2)Cp_3(T_L-T_0) \quad (3.4.3)$$

Reorganizando y despejando m_2 se tiene:

$$m_2 = \frac{m_1(T_1-T_L)}{T_L-T_2} \quad (3.4.4)$$

Lo anterior según la Figura 7.

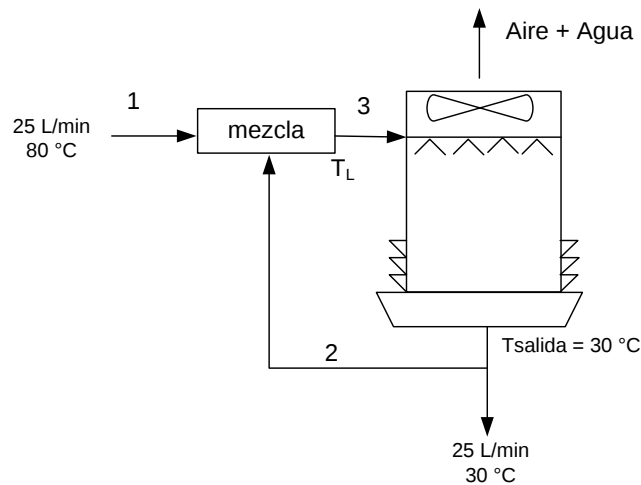


Figura 7. Esquema de recirculación de la torre de enfriamiento.

Para el flujo del fluido de proceso que llega a la torre de enfriamiento a una tasa de 25 L/min (m_1) y para una temperatura de operación de la torre de 70°C (T_L) usando la ecuación (3.4.4) se tiene que se debe recircular 12.2 L/min, para un total de flujo tratado en la torre de 37.2 L/min. Este último es el flujo de diseño a usar en los cálculos.

El interior de una torre de enfriamiento está constituido por un conjunto de entramados que obstaculizan el flujo descendente del líquido para aumentar el área de transferencia gas-líquido, similar a los platos en las columnas de destilación. Comercialmente se encuentran entramados de alta complejidad y eficiencia, pero al ser la planta para uso didáctico es necesario que sea económica y de fácil mantenimiento, adicional a ello las ecuaciones características de estos

entramados plásticos son propiedad de los proveedores que no difunden, por lo que se selecciona un entramado de listones de madera o metal, los cuales pueden estar organizados de múltiples formas cada uno con diferentes características, ver Figura 8 (15).

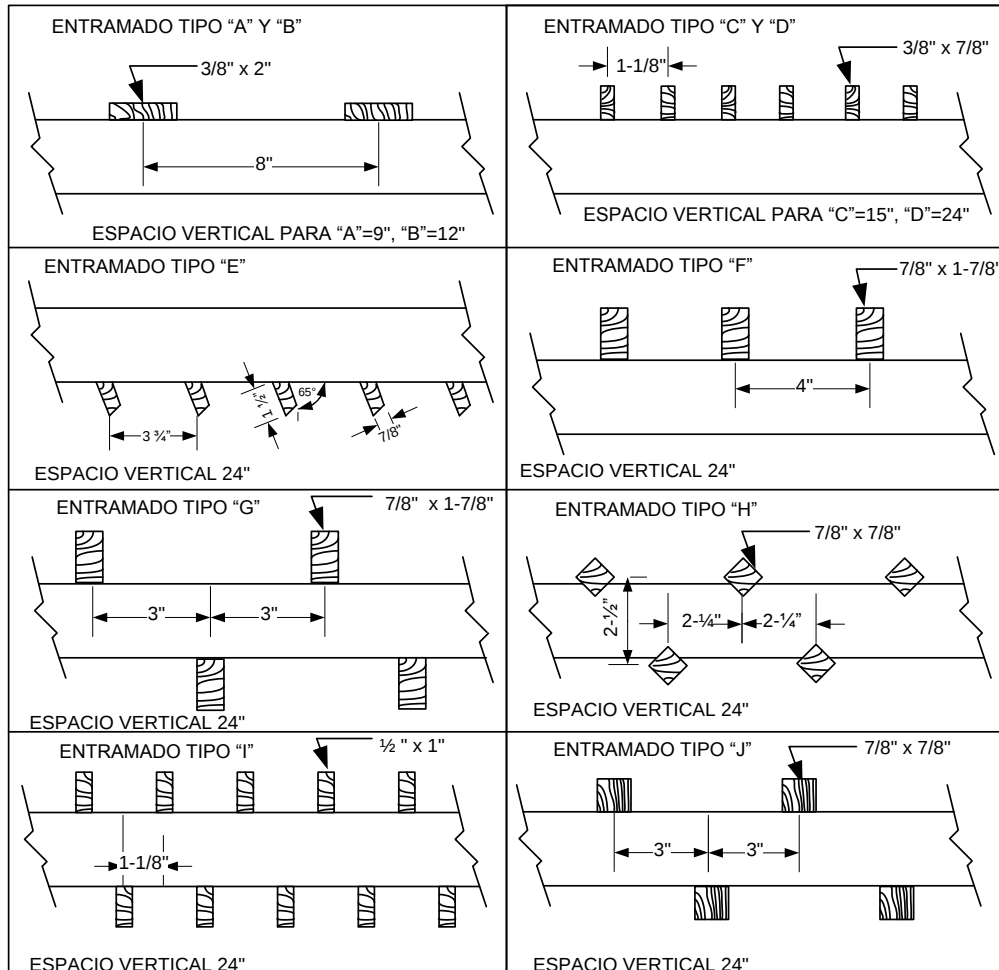


Figura 8. Diagrama de las diferentes configuraciones de entramados de listones.

Para determinar el número de entramados es necesario primero calcular el número de unidades de transferencia (NTU, por su sigla en inglés, equivalente a las secciones en las torres empacadas), el cual es determinado usando la ecuación (3.4.5) (16)

$$NTU = \frac{K_a V}{L} = \int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{dT}{H_L^* - H_G} \quad (3.4.5)$$

En donde, H_G es la entalpia del aire húmedo que depende de la temperatura, H_L es la entalpia del aire saturado, T_{in} es la temperatura del agua a la entrada y T_{out} a

la salida. Esta integral puede ser resuelta numéricamente entre 30°C y 70°C, con lo que se tiene para este caso que $NTU = 0.75$

Un resumen del proceso de enfriamiento se muestra en la Figura 9. Este proceso puede representarse en el diagrama de equilibrio entalpia del gas (H_G) vs temperatura del líquido (T_L), ver Figura 10, en donde la pendiente de la línea de operación es $\frac{L}{G}C_{p_w}$ (17) y debe ser menor al que tomaría si el aire saliera completamente saturado, normalmente se toman valores entre 0.75 y 2.5 para diseño (18).

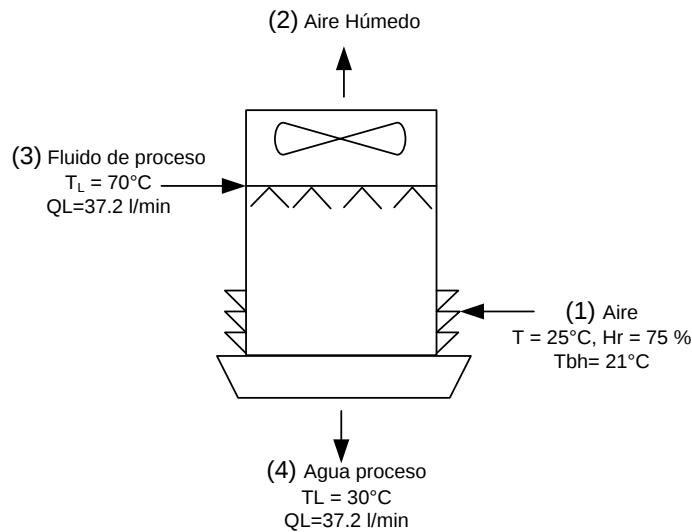


Figura 9. Diagrama simplificado del proceso de enfriamiento en la torre.

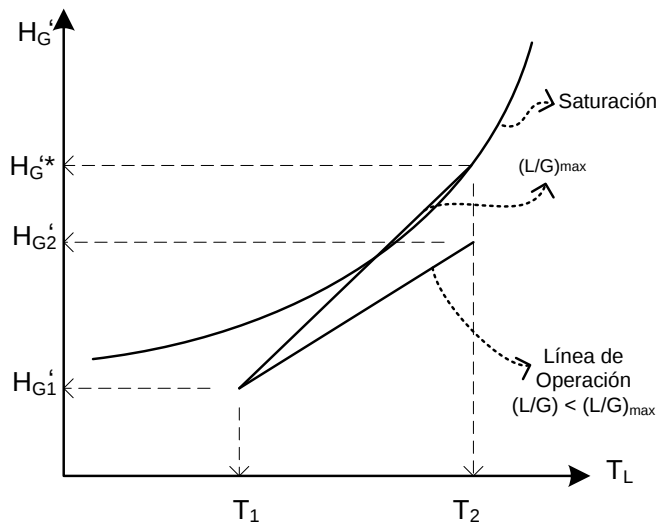


Figura 10. Diagrama de equilibrio y líneas de operación de humidificación.

En este caso el valor máximo es 22.2, por lo que se puede seleccionar libremente un valor dentro el rango mencionado anteriormente y de este dependerá las dimensiones finales; se desarrolla un análisis de sensibilidad para seleccionar el valor más adecuado de la relación L/G, obteniendo las menores dimensiones de la torre con bajas perdidas de presión a través de la torre, el análisis se puede observar en el anexo A.5, seleccionando en este caso 0.75 como la mejor relación, pues aporta un balance entre altura y ancho de la torre menor, además de minimizar las pérdidas de presión en la sección empacada. Con este valor se tiene que el flujo de aire necesario en la torre es 48.8 m³/min.

Teniendo los valores de NTU y L/G, se pueden calcular el número de entramados (N) despejando de la ecuación (3.4.6), en donde A y n son constantes que dependen del arreglo seleccionado en el entramado y sus valores se muestran en la Tabla 3 (15)

$$NTU=0.07+AN\left(\frac{L}{G}\right)^{-n} \quad (3.4.6)$$

Tabla 3. Constantes de la ecuación 3.4.6 para los diferentes entramados.

Entramado tipo	A	n
A	0.060	0.62
B	0.070	0.62
C	0.092	0.60
D	0.119	0.58
E	0.110	0.46
F	0.100	0.51
G	0.104	0.57
H	0.127	0.47
I	0.135	0.57
J	0.103	0.54

Con el número de entramados calculado y el espaciamiento vertical entre secciones entramadas se puede calcular la altura de la sección empacada, los valores calculados de la altura para la relación L/G = 0.75 se pueden observar en la Tabla 4.

Estudios realizados sobre columnas de enfriamiento muestran que para tener un equilibrio entre los costos de energía de bombeo y ventilación, para columnas entre 7 y 40 ft de altura, el flux de aire a través de la torre (G_a) debería estar entre 2000 y 1400 lb/h ft² (14). Extrapolando esto para las dimensiones obtenidas en la

columna didáctica se puede calcular el flux y usando el flujo de aire calculado anteriormente se puede obtener el área transversal de la torre y por ende el ancho de esta, los cálculos realizados para el caso de estudio se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 4. Altura de la sección empacada para los diferentes tipos de entramado.
Según $L/G = 0.75$

Entramado tipo	N	Z [cm]
A	4	91
B	3	91
C	3	114
D	2	122
E	2	122
F	2	122
G	2	122
H	2	122
I	2	122
J	2	122

Tabla 5. Área transversal y ancho de la torre de enfriamiento para los diferentes tipos de entramado.

Entramado tipo	Área [ft ²]	Ancho [cm]
A	3.00	53
B	3.00	53
C	3.03	53
D	3.03	53
E	3.03	53
F	3.03	53
G	3.03	53
H	3.03	53
I	3.03	53
J	3.03	53

Para calcular las características del ventilador que se debe usar, es necesario calcular primero las pérdidas de presión que se presentan en el interior de la torre (eliminadores, empaque y persianas).

El cálculo de la caída de presión en la sección empacada se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{\text{relleno}} = N \left(\frac{0.0675}{\rho_G} \right) (B G_a^2 + C \sqrt{S_F} L_a G_E^2) \quad (15) \quad (3.4.7)$$

En donde los parámetros S_F , B y C son característicos de cada entramado y sus valores se encuentran en la Tabla 6, N es el número de entramados, G_a es el flux de aire [lb/h ft^2], L_a es el flux de agua, ρ_G es la densidad del aire [lb/ft^3] y G_E se calcula usando la ecuación 3.4.8.

$$G_E = \sqrt{G_a^2 + \frac{4}{3} G_a 3600 \rho_G \sqrt{2g S_F} + g (3600 \rho_G)^2 S_F} \quad (15) \quad (3.4.8)$$

Tabla 6. Parámetros para las ecuaciones 3.4.7 y 3.4.8.

Entramado tipo	S_F [ft]	B (10^9)	C (10^{13})
A	3.00	3.4	1.1
B	4.00	3.4	1.1
C	3.75	4.0	1.4
D	6.00	4.0	1.4
E	4.95	6.0	1.5
F	9.13	2.6	0.7
G	6.85	4.0	1.0
H	3.64	7.5	2.6
I	4.50	5.2	1.6
J	6.85	4.0	1.0

La caída de presión en las persianas es independiente al tipo de entramado utilizado y solamente depende del flujo de aire a utilizar y el área abierta de las persianas. Para el presente diseño se estableció una altura de zona con persianas de 35 cm en dos lados de la torre abierta. La heurística indica que para torres que manejan velocidades de aire ($G/\text{Área abierta persianas}$) de 400 ft/min se tiene una caída de presión de 0.02 in H_2O y para torres que funcionan a 1600 ft/min se tiene una caída de presión de 0.32 in H_2O (18).

Por el contrario, la caída de presión en los eliminadores de neblina es proporcional al flux de aire necesario y este a su vez depende de la eficiencia del entramado a utilizar. Experimentalmente se ha encontrado que para un flux entre 800 y 2000 lb/h ft^2 se tiene una caída de presión entre 0.01 y 0.07 in H_2O respectivamente (18).

Los valores calculados para el caso de estudio desarrollado en el presente trabajo se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Caídas de presión en la torre de enfriamiento.

Entramado tipo	ΔP Relleno [in H₂O]	ΔP Persianas [in H₂O]	ΔP Eliminadores [in H₂O]	ΔP Total [in H₂O]
A	0.0948	0.0278	0.0796	0.2023
B	0.0776	0.0278	0.0796	0.1851
C	0.0904	0.0278	0.0788	0.1970
D	0.0730	0.0278	0.0786	0.1794
E	0.0886	0.0278	0.0786	0.1951
F	0.0524	0.0278	0.0786	0.1588
G	0.0673	0.0278	0.0786	0.1737
H	0.1109	0.0278	0.0786	0.2173
I	0.0796	0.0278	0.0786	0.1860
J	0.0673	0.0278	0.0786	0.1737

Teniendo la caída total de presión en el sistema se puede calcular la potencia necesaria del ventilador usando la ecuación 3.4.9 (18).

$$BHP = \frac{G \Delta P_{total}}{6356 \cdot \varepsilon} \quad (3.4.9)$$

Donde ε es la eficiencia del ventilador seleccionado, que en el caso de ser con acople de engranajes es del 50% (18).

Después de analizar los resultados para los diferentes tipos de entramado, se escoge para este diseño el entramado tipo B pues permite obtener una mejor relación entre ancho y alto, con las medidas más pequeñas para el valor L/G seleccionado y con la menor caída de presión a través de la torre (ver sensibilidad en anexo A.5).

Para encontrar las revoluciones del motor y el diámetro del ventilador se utilizan las correlaciones presentadas en los Gráficos 1 y 2, para una caída de presión total en la torre de 0.185 in H₂O (19).

Se obtuvo un diámetro de 51 cm para el ventilador, con 415 RPM para un motor comercial de 0.25 hp.

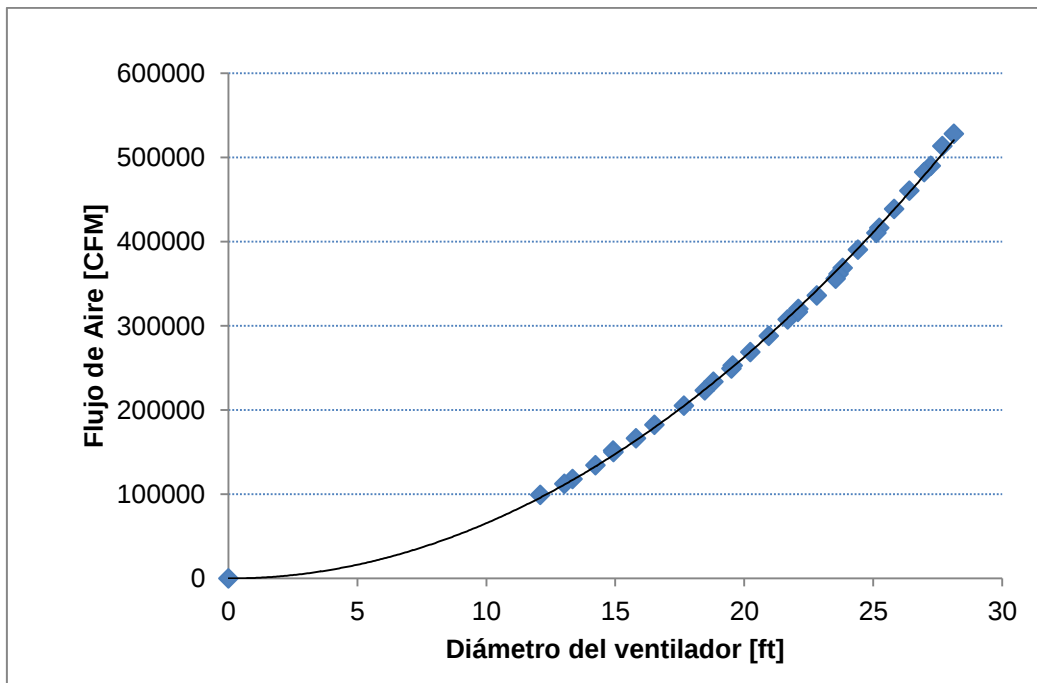


Grafico 1. Flujo de Aire vs Diámetro del Ventilador para una caída de presión de 0.185 in H_2O . (18)

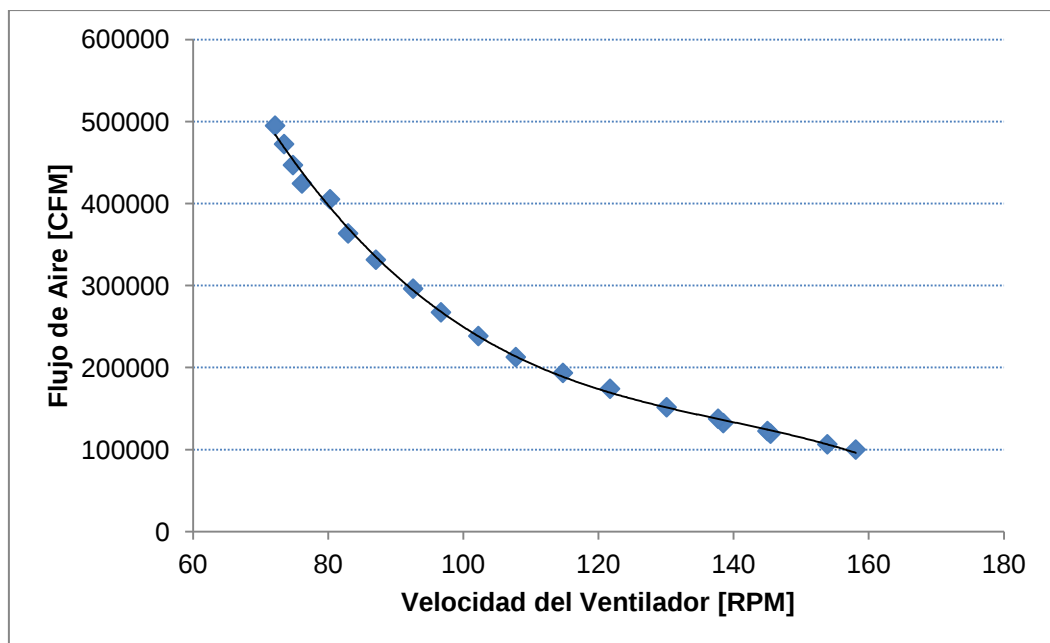


Grafico 2. Flujo de Aire vs Velocidad del Ventilador para una caída de presión de 0.185 in H_2O (18).

La pileta de la torre de enfriamiento debe almacenar el agua que baja de la sección empacada y permitir una cabeza hidrostática a las bombas que llevan el agua hasta el tanque de almacenamiento de agua fría. La geometría de la pileta es trapezoidal para evitar la acumulación de lodos en el fondo, y facilitar la limpieza de posibles sedimentos, ver Figura 11. Para determinar las dimensiones de la pileta es necesario definir un tiempo de residencia máximo del líquido en la base (τ), la inclinación del fondo (y) y la relación lado pileta/lado torre (x).

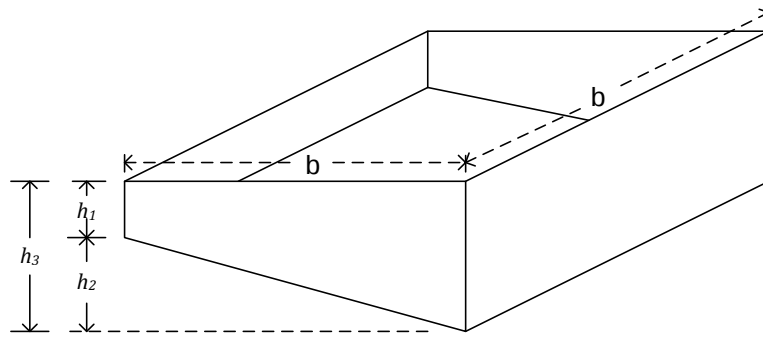


Figura 11. Diagrama estructural de la pileta de la torre de enfriamiento.

Con la ecuación (3.4.10) se puede determinar la altura h_1 de la pileta, su deducción puede verse en el anexo A.6, en donde F_{in} es el flujo a tratar y L_{torre} es la medida del ancho de la torre.

$$h_1 = \frac{\tau F_{in}}{(1+x)^2 L_{torre}^2 \left(1 + \frac{y}{2}\right)} \quad (3.4.10)$$

Para este caso se seleccionó un tiempo de residencia de 5 min, una inclinación de 2.5% y un exceso del ancho con respecto a la sección empacada del 10%, con lo que la altura h_1 de la pileta es de 36 cm. Los planos de la torre de enfriamiento pueden verse en detalle en el anexo A.7.

3.5 Tanques de almacenamiento

Para la planta de intercambio térmico se deben diseñar dos tanques de almacenamiento para los fluidos que intervienen, uno para el agua de proceso y otro para el fluido energético. Estos tanques deben tener la capacidad para operar la planta con 5 minutos de autonomía y así poder tener los flujos que se utilizan en los respectivos circuitos, deben ser capaces de almacenar el volumen de los fluidos que están contenidos en los equipos y en su respectiva línea por si es necesario realizar algún mantenimiento. La relación L/D usada para los dos casos es 3 y un factor de diseño del 10% para evitar el rebose (20).

- TK-300 Almacenamiento del fluido energético.

En esta línea se tiene un flujo máximo de 15 L/min, despreciando el volumen de líquido en las tuberías y al interior del calentador de agua y con las consideraciones planteadas se obtiene un tanque cilíndrico vertical con capacidad de almacenar 170 L, de 42 cm de diámetro y 125 cm de alto, para un volumen total nominal de 173 L, ya que el tanque almacenará agua con una temperatura superior a los 50 °C, es conveniente aislarlo térmicamente, se debe utilizar preformado de lana de vidrio para tal fin, con un espesor mínimo de 50 mm. (7)

- TK- 400 Almacenamiento de fluido de proceso.

En el circuito de fluido de proceso se tiene un flujo máximo de 25 L/min, teniendo en cuenta el volumen de la pileta de la torre de enfriamiento de 125 L y despreciando el volumen en las tuberías, con las consideraciones planteadas se obtiene un tanque cilíndrico vertical de 275 L de 49 cm de diámetro y 147 cm de alto, para un volumen total nominal de 277 L.

3.6 Instrumentación industrial

La selección de la instrumentación utilizada en la planta se realiza teniendo en cuenta los parámetros y condiciones de operación. Es muy importante mencionar que los principios de medición de los equipos seleccionados son iguales a los que generalmente se encuentran en una planta industrial. En la Tabla 8 se presentan los equipos seleccionados en cada sección de la planta, los manómetros de la planta son del tipo Bourdon.

Tabla 8. Instrumentación seleccionada para la planta.

VARIABLE	UBICACIÓN	PRINCIPIO DE MEDICIÓN	IDENTIFICACIÓN
Planta auxiliar			
Nivel	Pileta torre de enfriamiento	Presión diferencial	LT-200
Temperatura	Pileta torre de enfriamiento	Efecto termoeléctrico (sensor: termocupla tipo J)	TT-200
Temperatura	Calentador H-700	Efecto termoeléctrico (sensor: RTD)	TC-700

Continuación tabla 8.

VARIABLE	UBICACIÓN	PRINCIPIO DE MEDICIÓN	IDENTIFICACIÓN
Planta auxiliar			
Nivel	Tanque TK-300	Ultrasónico	LT-300
Temperatura	Tanque TK-300	Efecto termoeléctrico	TT-300
Bajo nivel	Tanque TK-300	Tipo horquillas vibratorias	LSL-300
Nivel	Tanque TK-400	Presión diferencial	LT-400
Temperatura	Tanque TK 400	Efecto termoeléctrico (sensor: termocupla tipo J)	TT-400
Bajo nivel	Tanque TK-400	Tipo horquillas	LSL-400
Control (PLC)	HT-100	Controlador lógico programable Allen Bradley controllogix, serie 5000	PLC-1
Control de flujo	CT-200	Válvula de control tipo globo	CV-500
Planta intercambiador de calor HT-100			
Temperatura	HT-100	Efecto termoeléctrico (sensor: termocupla tipo J)	TT-100, TT-101 TT-102, TT103
Flujo	HT-100	Presión diferencial Platina de orificio	FT-100
Flujo	HT-100	Coriolis	FT-101
Flujo	HT-100	Vortex	FT-102
Flujo	HT-100	Electromagnético	FT-103
Control de flujo	HT-100	Válvula de control tipo globo	CV-101, CV-102
Control (PLC)	HT-100	Controlador lógico programable Allen Bradley controllogix, serie 5000	PLC-2

3.7 Distribución de la planta

Para la implementación de la planta se ha dispuesto un área de 65 m², con 13 m de fondo por 5 m de ancho, en la cual además de los equipos se ha dispuesto de un área de 18 m² para las mesas de trabajo. La distribución de la planta se presenta en los anexos A.8 a A.12, donde también se muestra las longitudes de la tubería para los diferentes tramos.

3.8 Diagramas de instrumentación y tubería

Se presenta el diagrama de instrumentación y tubería (Anexo A.1) donde se observan los diferentes equipos e instrumentos de la planta, así como los lazos de control a ser implementados.

3.9 Cálculo de tuberías y selección de bombas

Para realizar el cálculo de la tubería se deben tener en cuenta las diferentes condiciones de proceso presentes en los circuitos, como el flujo y el tipo de fluido a manejar. La principal condición a tener en cuenta en el sistema son la succión y la descarga de las bombas, el fluido a manejar es agua a 30 °C (fluido de proceso al salir de la torre) y 60 °C (fluido energético al salir del intercambiador de calor), a razón de 25 L/min y 31 L/min respectivamente. Para el caso de estudio se usa una tubería de acero inoxidable cedula 10 debido a las bajas presiones de operación y la alta resistencia del material. Según la heurística, para evitar problemas en la tubería se deben cumplir unos parámetros básicos de diseño, los cuales se pueden observar en la Tabla 9 (20).

Tabla 9. Escenarios de bombeo para el dimensionamiento de tuberías.

Escenario	Velocidad Máxima [ft/s]	Caída de Presión en la tubería [psi/100 ft]
Succión de una bomba y líquido sub-enfriado	8	2
Descarga de una bomba	15	3

Usando la velocidad máxima de diseño para los diferentes flujos y las diferentes condiciones, se puede calcular el diámetro mínimo que debería tener la tubería para garantizar su buen funcionamiento. Estos resultados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Diámetros mínimos de tubería permisibles a velocidades máximas.

Escenario	Fluido de Proceso	Fluido Energético
Succión de una bomba y líquido sub-enfriado	0.58"	0.65"
Descarga de una bomba	0.42"	0.47"

Para estos diámetros mínimos requeridos se tiene que para la succión de la bomba se debe usar mínimo tubería de 1/2 y para las descarga de la bomba 3/8. Para determinar la tubería apropiada se calcula la caída de presión para las tuberías por encima de estos límites y se selecciona aquella que cumpla el criterio de caída de presión, ver Tabla 11.

Tabla 11. Caídas de presión a diferentes diámetros de tubería (psi/100 ft).

Diámetro Nominal [in]	Fluido de Proceso	Fluido Energético
3/8	54.11	35.71
1/2	18.17	12.05
3/4	4.59	3.07
1	1.56	1.05

Según los criterios de velocidad y caída de presión se tiene que la tubería para el fluido de proceso debería ser de 1" para la succión de la bomba y 3/4" para la descarga. En el caso del fluido energético se necesitaría al menos una tubería de 1" tanto en la succión como en la descarga de la bomba, es muy importante tener en cuenta ya que se tendrá agua en condiciones de temperatura superiores a 50 °C, que esta tubería debe ser aislada; en este caso se puede utilizar preformado de lana de vidrio con un espesor de 51 mm (21).

Con los diámetros de tubería seleccionados es posible determinar las cabezas hidráulicas de las bombas P-200, P-300 y P-400 a utilizar en el sistema y así realizar la selección de las bombas de acuerdo al flujo a manejar y la cabeza necesaria, de acuerdo a los catálogos que ofrecen los distintos proveedores. Las cabezas hidráulicas necesarias al igual que las referencias de las bombas seleccionadas se encuentran en la Tabla 12, un ejemplo del cálculo de la cabeza hidráulica de una bomba se encuentra en el anexo A.13, el catálogo de las bombas seleccionadas se encuentran en el anexo A.14.

Tabla 12. Bombas seleccionadas para los circuitos de bombeo.

Bomba	Cabeza Mínima Necesaria [m]	Referencia
P-200	3,23	Pedrollo CP110
P-300	16,64	Pedrollo CP130
P-400	13,65	Pedrollo CP130

3.10 Costo aproximado por equipos

El costo de los equipos fue presentado por proveedores como Colmaquinas, Industrias GAMO Ltda, Aceroscol S.A, Colsein Ltda y Didacontrol S.A:S.

Tabla 13. Costo por equipos

Equipo o recipiente	Valor
Filtro F-500	550.000
Suavizador S-600	2.150.000
Tanque TK-300	4.550.000
Tanque TK-400	3.975.000
Bomba P-200	820.000
Bomba P-300	820.000
Bomba P-400	750.000
Intercambiador de calor HT-100	14.345.300
Calentador a gas natural H-700	5.500.000
Torre de enfriamiento CT-200	10.365.000
Compresor	3.540.000
TOTAL	47.365.450

Nota: El valor se muestra en pesos colombianos, los valores aplican para Enero 15 de 2012, estos valores no incluyen el IVA.

Tabla 14. Costos de accesorios e instrumentación.

Accesorios e instrumentos	Cantidad	Valor
Válvula de bola	18	850.000
Válvula de control tipo globo	3	25.000.000
Transmisor de flujo por coriolis	1	27.000.000
Transmisor de flujo de presión diferencial.	1	9.500.000
Transmisor de flujo electromagnético	1	10.000.000
Transmisor de flujo vortex	1	12.000.000
Transmisor de nivel ultrasónico	3	18.300.000
Transmisor de temperatura	6	7.400.000
Termocupla	6	360.000
Manómetro	4	240.000
PLC	2	21.000.000
Sensor de bajo nivel	2	1.900.000
Tubería inoxidable 304	100 m	5.000.000
TOTAL		138.550.000

Nota: El valor se muestra en pesos colombianos, los valores aplican para Enero 15 de 2012 estos valores no incluyen el IVA.

Manual de operación de la planta de intercambio térmico

El manual de operación de la planta se presenta en el anexo A.15.

4. CONCLUSIONES

El área necesaria para instalar la planta es de 65 m², por lo que su implementación en una institución educativa que se encuentre en funcionamiento, no acarreará mayores problemas relacionados con adquisición de predios adicionales para su edificación. Los materiales de construcción de los equipos se pueden adquirir fácilmente en Colombia, por lo cual, la planta puede ser construida y puesta en marcha por personal propio del país.

A pesar que los caudales de operación son relativamente pequeños, en comparación a los utilizados en la gran mayoría de las industrias, es posible reproducir gran cantidad de eventos comunes en los procesos de producción, permitiendo así, que durante las diversas prácticas los estudiantes adquieran la destreza necesaria para reaccionar ante posibles eventualidades que se puedan presentar durante su vida laboral.

Además del aprendizaje acerca de la transferencia de calor, esta planta permite afianzar conocimientos en PLC, control de procesos y adquisición de datos del proceso en tiempo real, debido a que cuenta con un sistema de PLC que permite establecer diferentes lazos de control de acuerdo a cada práctica que se desee realizar.

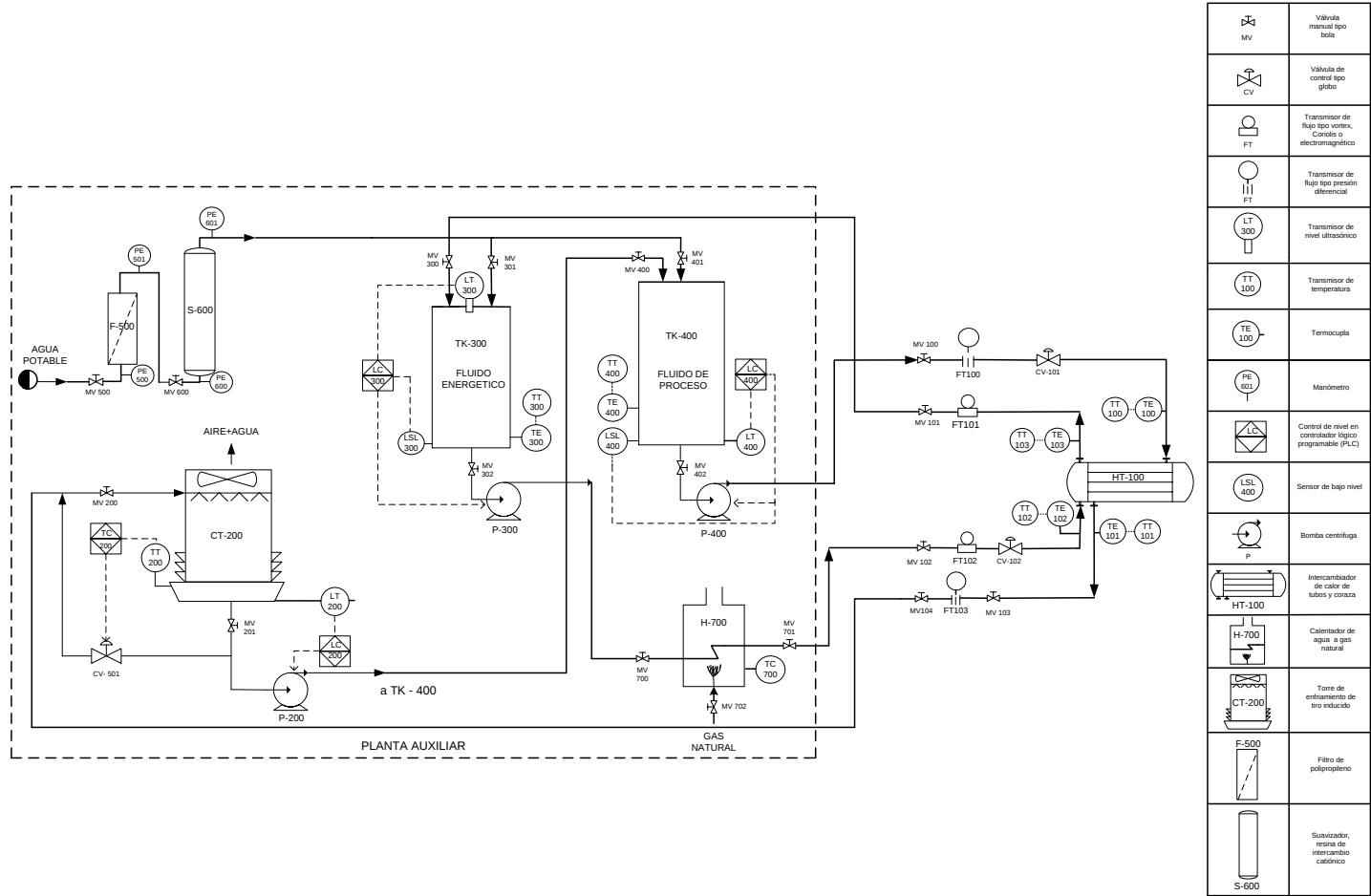
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Johnstone, Robert Edgeworth y Thring, Meredith Wooldridge. *Pilot plants, models, and scale-up, methods in chemical engineering*. Estados Unidos : McGraw-Hill Book Company, 1957.
2. Escalamiento, *El Arte de la Ingeniería Química: Plantas Piloto, el Paso Entre el Huevo y la Gallina*. Anaya, A y Pedroza, H. 001, México D. F. : s.n., 2008, Tecnología, Ciencia, Educación, Vol. 23, págs. 31-39.
3. Moreno, Jorge. *Gestion del Diseño e Implementación de los Sistemas Didácticos, Tecnológicos y Técnicos de una Planta de Intercambio Térmico*. Cali : Servicio Nacional de Aprendizaje, 2010.
4. Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4a Edición. México : Prentice Hall, 1999.
5. Kern, Donald Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. Trigésima primera reimpresión. Mexico : McGraw Hill, 1999.
6. Cheremisinoff, Nicholas P. y Paul N. *Cooling towers, selection, design and practice*. Michigan : Ann Arbor Science Publishers, 1981.
7. Megyesy, Eugene F. *Manual de recipientes a Presion, Diseño y Calculo*. Mexico, D.F. : Limusa-Noruega, 2008.
8. Perry, Robert H. y Green, Don W. *Perry Manual del Ingeniero Químico*. Sexta edición. s.l. : Mc Graw Hill . Vol. II.
9. Mott, Robert L. *Mecánica de fluidos*. Sexta edición. Mexico : Prentice Hall, 2006.
10. Creus, A. *Instrumentación Industrial*. 6ta Edición. Barcelona : Marcombo S. A., 1997.
11. Fonseca, Carlos. PCS Medio Ambiente. [En línea] 23 de Septiembre de 2010. [Citado el: 14 de Junio de 2011.] <http://www.acsmedioambiente.com/equipos/suavizadores.htm>.
12. Martinez, Jose. *Diseño de un tren de filtracion para obtener agua embotellada*. Mexico : Mediterraneo, 2003.

13. Turton, R., y otros. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Segunda edición. N. J. : Prentice Hall, 2003.
14. Ludwig, E. E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical*. Tercera edición. Houston : Gulf Publishing Co., 1979. Vol. III.
15. *Comparative Performance of Cooling Tower Packing Arrangements*. Kelly, N. W. y K., Swenson L. 7, 1956, Chemical Engineering Progress, Vol. 52, págs. 263-268.
16. *CTI Code Tower Standard Specifications*. Institute, Cooling Tower. 105, Houston : ATC, 1982, Vol. Addendum 1.
17. Treybal, R. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2da Edición. s.l. : McGraw Hill, 1967.
18. Ludwig, E. E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. 3ra Edición. Houston : Publicaciones Butterworth-Heinemann, 1997.
19. *Counterflow Cooling Towers*. Whitesell, J. 1, 1955, Chemical Engineering, págs. 187-191.
20. Turton, Richard, Bailie y C., Richard. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. New Jersey : Prentice Hall, 1984.
21. *Beneficios del aislamiento termico en la industria*. Conuee, secretaria de energia. 12, Mexico : Pyme, 2009, Vol. 234.

ANEXOS

A.1. Diagrama de instrumentación y tubería (P&ID)- planta de intercambio térmico.



A2. Plano calentador de agua BOSCH Therm 8000s.

Sistemas de Alta Eficiencia y Bajo Consumo de Combustible

Característica Técnicas – Generalidades

Generalidades		
Tensión de alimentación	V	120
Frecuencia	Hz	60
Potencia máxima absorbida	W	112
Tipo de protección	IP	X4D
Temperatura ambiente admisible	°C	0 - 50
Nivel de ruido	db (A)	59
Peso (sin embalaje)	kg	34



Sistemas de Alta Eficiencia y Bajo Consumo de Combustible

Característica Técnicas – Potencia y Presión de Gas

Características técnicas		Simbolos	Unidades	Therm 8000 S
Potencia				
Potencia útil		P _n	kW	40.0
Potencia útil mínima		P _{min}	kW	5.5
Campo de regulación			kW	5.5 - 40.0
Caudal térmico		Q _n	kW	48.0
Caudal térmico mínimo		Q _{min}	kW	6.0
Datos relativos al gas				
Presión de alimentación				
Gas natural		G20	mbar	20
GPL (Butano)		G30	mbar	28
Consumo				
Gas natural		G20	m ³ /h	4.1
GPL (Butano)		G30	m ³ /h	1.4



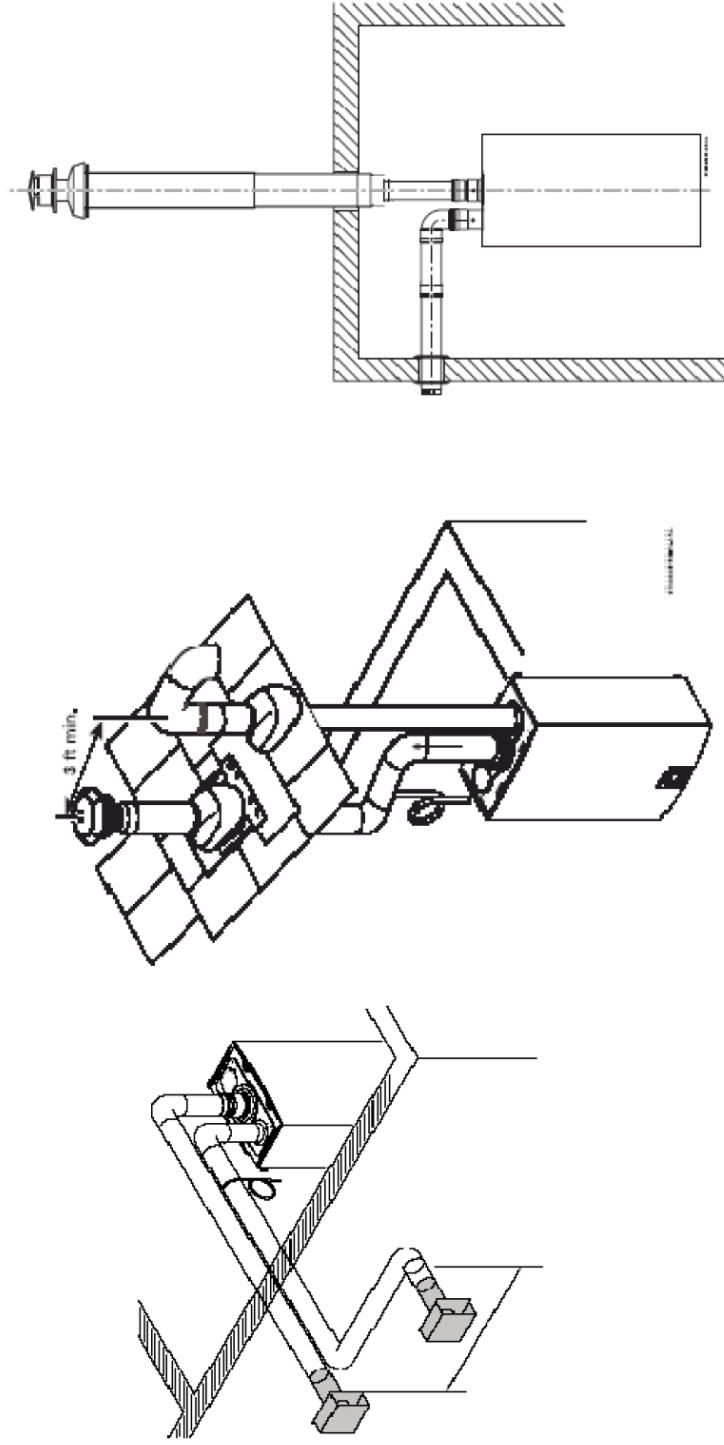
Característica Técnicas – Agua y Productos de Combustión

Datos relativos al agua			
Presión máxima admisible	pw	bar	12
Presión mínima de funcionamiento	pw min	bar	0.3
Caudal mínimo de funcionamiento		l/min	2.5
Caudal máximo, correspondiente a una elevación de temp. de ΔT 25°C		l/min	23
Datos relativos a los productos de combustión conforme DIN 4705			
Caudal de productos de combustión:			
Gas natural H		kg/h	81.8
Gas Butano		kg/h	69.1
Temperatura de los gases de combustión			
Temperatura de los gases quemados con la potencia máxima		°C	60
Temperatura de los gases quemados con la potencia mínima		°C	29

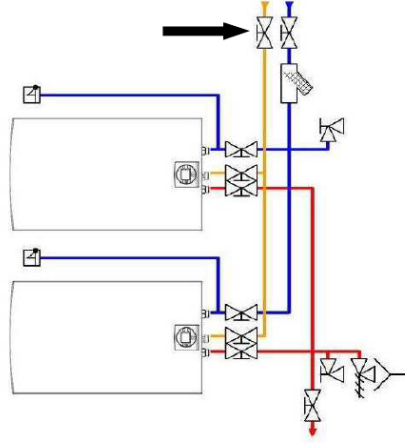
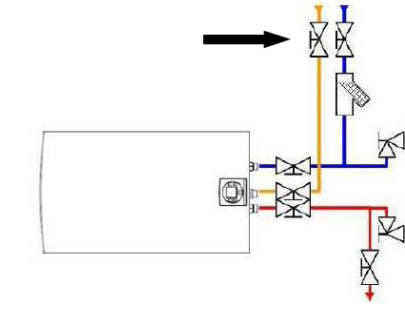


Sistemas de Alta Eficiencia y Bajo Consumo de Combustible

Admisión y Evacuación de Gases



Accesorios de Instalación

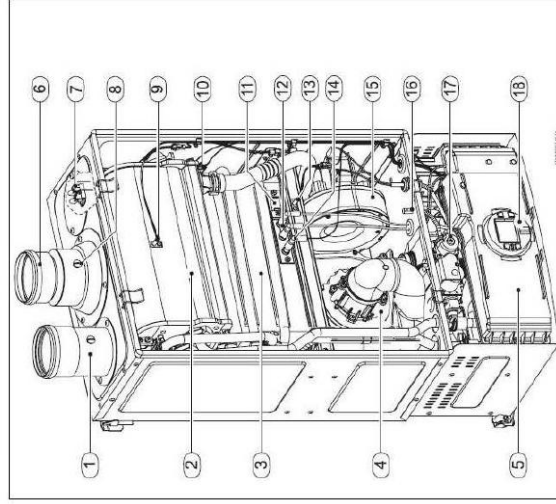
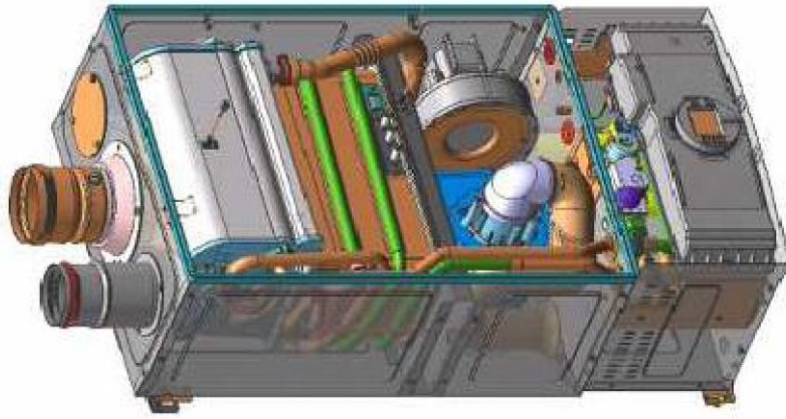


- **Válvulas de Corte de Sección:** Generalmente son omitidas por el instalador. Su importancia aumenta proporcionalmente con la complejidad de la instalación. Para propósitos de mantenimiento, su mayor importancia es el permitir el aislamiento de los sub-circuitos dentro de toda la instalación sin necesidad de interrumpirla por completo



Sistemas de Alta Eficiencia y Bajo Consumo de Combustible

Cuáles son sus componentes?



- | | | | |
|----------|--|-----------|--|
| 1 | Accesorios de admisión del aire (no incluido) | 10 | Limitador de temperatura |
| 2 | Unidad de condensación | 11 | Ventana de control |
| 3 | Cámara de combustión | 12 | Conjunto de ignición |
| 4 | Mezclador Aire/Gas | 13 | Sensor de retorno de los gases de combustión |
| 5 | Caja electrónica | 14 | Sensor de ionización |
| 6 | Accesorios de evacuación (no incluido) | 15 | Ventilador |
| 7 | Limitador de temperatura de la caja estanca | 16 | Toma de presión de la caja estanca |
| 8 | Tornillo de medición de CO ₂ | 17 | Válvula de gas |
| 9 | Sensor de fuga de temperatura de los gases de combustión | 18 | Panel de mando |



A.4. Planos intercambiador de calor.

A.5. Sensibilidad de los cálculos de la torre de enfriamiento.

$$L/G = 0.75$$

Deck	N	Z [cm]	Ga [lb/h*ft^2]	S [ft^2]	ancho [cm]	alto/ancho	GE [lb/h*ft^2]	La [lb/h*ft^2]	dP Relleno [in H2O]	Velocidad aire [fpm]	dP Persianas [in H2O]	dP Eliminadores [in H2O]	dP Total [in H2O]	Potencia Motor [hp]
A	4	91	2193	3.00	53	1.72	4381	1643	0.095	431	0.028	0.080	0.202	0.110
B	3	91	2193	3.00	53	1.72	4725	1643	0.078	431	0.028	0.080	0.185	0.100
C	3	114	2177	3.03	53	2.15	4628	1631	0.090	431	0.028	0.079	0.197	0.107
D	2	122	2171	3.03	53	2.30	5282	1627	0.073	431	0.028	0.079	0.179	0.097
E	2	122	2171	3.03	53	2.30	4993	1627	0.089	431	0.028	0.079	0.195	0.106
F	2	122	2171	3.03	53	2.30	6020	1627	0.052	431	0.028	0.079	0.159	0.086
G	2	122	2171	3.03	53	2.30	5499	1627	0.067	431	0.028	0.079	0.174	0.094
H	2	122	2171	3.03	53	2.30	4586	1627	0.111	431	0.028	0.079	0.217	0.118
I	2	122	2171	3.03	53	2.30	4860	1627	0.080	431	0.028	0.079	0.186	0.101
J	2	122	2171	3.03	53	2.30	5499	1627	0.067	431	0.028	0.079	0.174	0.094

Deck	Altura Corta Pileta (h ₁) [cm]	altura larga pileta (h ₃) [cm]	ancho de la pileta [cm]
A	36.3	37.2	58.3
B	36.3	37.2	58.3
C	36.3	37.2	58.3
D	36.3	37.2	58.3
E	36.3	37.2	58.3
F	36.3	37.2	58.3
G	36.3	37.2	58.3
H	36.3	37.2	58.3
I	36.3	37.2	58.3
J	36.3	37.2	58.3

$$L/G = 1.5$$

Deck	N	Z [cm]	Ga [lb/h*ft^2]	S [ft^2]	ancho [cm]	alto/ancho	GE [lb/h*ft^2]	La [lb/h*ft^2]	dP Relleno [in H2O]	Velocidad aire [fpm]	dP Persianas [in H2O]	dP Eliminadores [in H2O]	dP Total [in H2O]	Potencia Motor [hp]
A	7	160	2145	1.54	38	4.21	4334	3213	0.201	301	-0.005	0.077	0.274	0.074
B	6	183	2129	1.55	38	4.82	4662	3189	0.195	301	-0.005	0.076	0.267	0.072
C	4	152	2150	1.53	38	4.00	4601	3221	0.157	301	-0.005	0.078	0.229	0.062
D	3	183	2129	1.55	38	4.82	5240	3189	0.153	301	-0.005	0.076	0.225	0.061
E	4	244	2086	1.58	38	6.42	4909	3125	0.217	301	-0.005	0.074	0.287	0.078
F	4	244	2086	1.58	38	6.42	5937	3125	0.147	301	-0.005	0.074	0.216	0.059
G	4	244	2086	1.58	38	6.42	5415	3125	0.175	301	-0.005	0.074	0.245	0.066
H	3	183	2129	1.55	38	4.82	4544	3189	0.212	301	-0.005	0.076	0.283	0.077
I	3	183	2129	1.55	38	4.82	4818	3189	0.155	301	-0.005	0.076	0.226	0.061
J	4	244	2086	1.58	38	6.42	5415	3125	0.175	301	-0.005	0.074	0.245	0.066

Deck	Altura Corta Pileta (h ₁) [cm]	altura larga pileta (h ₃) [cm]	ancho de la pileta [cm]
A	70.7	72.4	41.8
B	70.7	72.4	41.8
C	70.7	72.4	41.8
D	70.7	72.4	41.8
E	70.7	72.4	41.8
F	70.7	72.4	41.8
G	70.7	72.4	41.8
H	70.7	72.4	41.8
I	70.7	72.4	41.8
J	70.7	72.4	41.8

$$L/G = 2.5$$

Deck	N	Z [cm]	Ga [lb/h*ft^2]	S [ft^2]	ancho [cm]	alto/ancho	GE [lb/h*ft^2]	La [lb/h*ft^2]	dP Relleno [in H2O]	Velocidad aire [fpm]	dP Persianas [in H2O]	dP Eliminadores [in H2O]	dP Total [in H2O]	Potencia Motor [hp]
A	12	274	2064	0.96	30	9.13	4255	5155	0.410	229	-0.023	0.073	0.461	0.075
B	10	305	2043	0.97	30	10.17	4578	5101	0.400	229	-0.023	0.072	0.449	0.073
C	7	267	2070	0.95	30	8.90	4522	5168	0.340	229	-0.023	0.073	0.390	0.063
D	6	366	2000	0.99	30	12.20	5115	4994	0.387	229	-0.023	0.070	0.434	0.071
E	5	305	2043	0.97	30	10.17	4867	5101	0.346	229	-0.023	0.072	0.396	0.064
F	6	366	2000	0.99	30	12.20	5853	4994	0.296	229	-0.023	0.070	0.343	0.056
G	6	366	2000	0.99	30	12.20	5331	4994	0.338	229	-0.023	0.070	0.385	0.063
H	5	305	2043	0.97	30	10.17	4459	5101	0.432	229	-0.023	0.072	0.482	0.078
I	5	305	2043	0.97	30	10.17	4734	5101	0.321	229	-0.023	0.072	0.370	0.060
J	6	366	2000	0.99	30	12.20	5331	4994	0.338	229	-0.023	0.070	0.385	0.063

Deck	Altura Corta Pileta (h ₁) [cm]	altura larga pileta (h ₃) [cm]	ancho de la pileta [cm]
A	113.4	116.2	33.0
B	113.4	116.2	33.0
C	113.4	116.2	33.0
D	113.4	116.2	33.0
E	113.4	116.2	33.0
F	113.4	116.2	33.0
G	113.4	116.2	33.0
H	113.4	116.2	33.0
I	113.4	116.2	33.0
J	113.4	116.2	33.0

A.6. Cálculo detallado de la pileta de la torre de enfriamiento.

La pileta de la torre de enfriamiento almacena el agua que baja de la sección empacada, en la Figura 11 se observan las dimensiones que se deben determinar, es de base cuadrada de lado mayor que la sección empacada, definido por el porcentaje de exceso respecto a esta (se construye inclinada para evitar que se presenten acumulación de partículas e impurezas), sea:

L_{torre} = Dimensión del lado de la torre en la sección empacada.

b = Dimensión del lado de la base de la pileta.

x = Porcentaje de exceso de la base de la pileta con relación al lado de la torre.

y = Relación de inclinación de la pileta.

τ = Tiempo de residencia para el cálculo del volumen total de la pileta.

V = Volumen total de la pileta.

F_{in} = Flujo volumétrico de entrada a la torre de enfriamiento.

h_1, h_2, h_3 = Dimensiones relacionadas para cada altura en la base de la pileta.

De acuerdo a lo expresado se tiene:

$$V = \tau F_{\text{in}}$$

$$b = (1+x)L_{\text{torre}}$$

$$y = \frac{h_2}{h_1}, \text{ luego } h_2 = yh_1$$

$$V = b^2 h_1 + \frac{h_2 b^2}{2}$$

$$V = b^2 h_1 + \frac{y h_1 b^2}{2}$$

$$V = b^2 h_1 + \left(1 + \frac{y}{2}\right)$$

$$V = (1+x)^2 L_{\text{torre}}^2 h_1 + \left(1 + \frac{y}{2}\right) = \tau F_{\text{in}}$$

Obteniendo finalmente

$$h_1 = \frac{\tau F_{\text{in}}}{(1+x)^2 L_{\text{torre}}^2 \left(1 + \frac{y}{2}\right)}$$

$$h_2 = y h_1$$

$$h_3 = h_1 + h_2 = (1+y) h_1$$

A.7. Planos torre de enfriamiento

[A.7.1 Dimensiones generales.](#)

A.7.2 Detalles de las rejillas de la torre de enfriamiento.

A.8. Distribución de la planta (diagrama de elevación).

A.9. Distribución de equipos (medidas y áreas).

A.10. Distribución de la planta (vista frontal).

A.11. Distribución de la planta-diagramas en 3D.

[A. 11.1 Detalles tramos de tubería.](#)

A.11.2 Detalles tramo de tubería desde CT-200 a TK-400 y HT 100

A.11.3 Detalles tramo de tubería desde HT-100 a H-700

A.11.4 Detalles tramo de tubería desde H-700 a HT-100

A.11.5 Detalles tramo de tubería desde HT-100 a CT-200

A.12. Fotos planta didáctica de intercambio térmico.

[A.12.1 Fotos planta didáctica de intercambio térmico. \(Vista isométrica\).](#)

A12.2 Área Intercambiador de calor.

A 12.3 Área de tanques de almacenamiento.

A 12.4 Área torre de enfriamiento.

A.13. Ejemplo de cálculo de la cabeza necesaria para una bomba.

En el siguiente ejemplo se realiza el cálculo de las caídas de presión en la tubería y cálculo de la cabeza mínima necesaria para la bomba P-200, correspondiente a la sección de tubería desde la torre de enfriamiento al TK-400, ver Figura A.13.1.

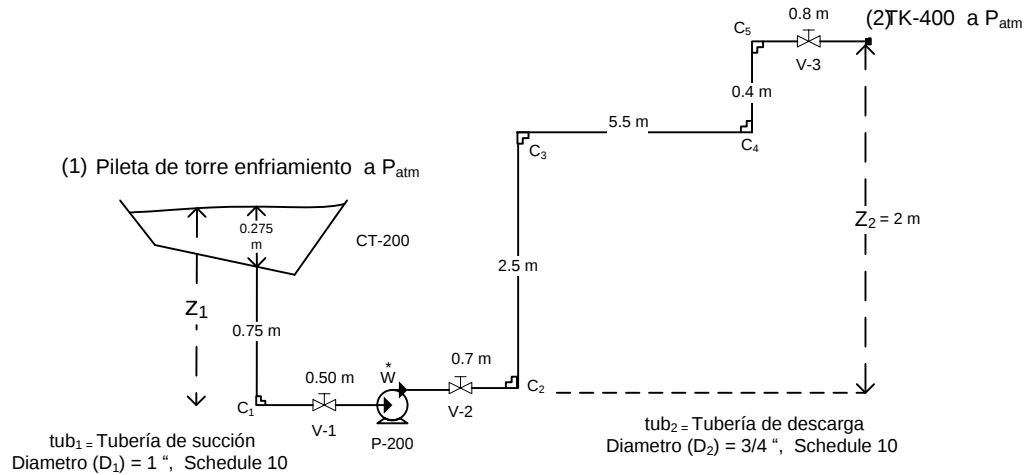


Figura A.13.1. Circuito de bombeo desde la torre de enfriamiento al tanque de fluido de proceso.

Tubería en acero inoxidable.

Rugosidad $(\varepsilon) = 4.572 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Velocidad fluido en la tubería de succión $V_1 = 0.909 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Velocidad fluido en la tubería de descarga $V_2 = 1.665 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ecuación de Bernoulli a temperatura constante:

$$\frac{V_1^2 \rho_1}{2} + P_1 + \rho_1 g_1 Z_1 + \dot{W} = \frac{V_2^2 \rho_2}{2} + P_2 + \rho_2 g_2 Z_2 + h_f \quad (\text{ec. A.13.1})$$

Dónde:

(ρ) Densidad del fluido.

(g) Gravedad.

(Z) Altura.

($\dot{W}$) Trabajo realizado del sistema o hacia el sistema.

(P) Presión.

(h_f) Perdidas de carga debido a accesorios y fricción en la tubería.

Ya que la presión es la misma en los puntos 1 y 2, y las propiedades de densidad y gravedad son constantes, se divide la ec. A.13.1 entre ρg , obteniendo:

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_b = \frac{V_2^2}{2g} + P_2 + Z_2 + h_f$$

$$h_b = (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_f \quad (\text{ec. A.13.2})$$

Donde h_b es la cabeza de la bomba.

De acuerdo a la Figura A.13.1, se definen las pérdidas de presión teniendo en cuenta cada elemento:

$$h_f = h_{\text{tub}_1} + h_{\text{codo}_1} + h_{\text{valv}_1} + h_{\text{valv}_2} + h_{\text{valv}_3} + h_{\text{codo}_2} + h_{\text{codo}_3} + h_{\text{codo}_4} + h_{\text{codo}_5} + h_{\text{tub}_2}$$

Ya que las características tanto de las válvulas 2, 3 y los codos 4, 5 y 6 son iguales se obtiene:

$$h_f = h_{\text{tub}_1} + h_{\text{codo}_1} + h_{\text{valv}_1} + 2h_{\text{valv}_2} + 4h_{\text{codo}_2} + h_{\text{tub}_2} \quad (\text{ec. A.13.3})$$

Se calcula cada uno de los términos de la expresión.

$$h_{\text{tub}} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde $f \rightarrow F(V, \epsilon)$.

(f) Factor de fricción de Fanny.

(L) Longitud de la tubería.

(D) Diámetro de la tubería.

$$h_v = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde L_e es longitud equivalente y es característica de cada tipo de válvula.

$$h_c = K_c \frac{V^2}{2g}$$

Donde K_c es una constante característica de cada tipo de codo.

Se debe calcular el valor de f para cada uno de las sesiones de tubería, por lo tanto se debe calcular el valor del número de Reynolds R_e y así determinar que ecuación utilizar para este cálculo.

$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu}$$

Calculando las pérdidas de presión para la sesión (1) de la tubería se tiene:

$R_{etub1} = 19730$, valor que representa estado de flujo turbulento por lo tanto:

$$f = 0.25 \left[\ln \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2 \quad \text{Para } \frac{D}{\epsilon} \text{ entre } [1000-1 \times 10^6] \text{ y } R_e \text{ entre } [5000-1 \times 10^8]$$

$$\begin{aligned} f_{tub1} &= 0.02882 \\ h_{tub1} &= 6.414 \times 10^{-3} \text{ m} \\ h_{v1} &= 0.4016 \text{ m} \end{aligned}$$

para la válvula de bola el valor de $\frac{L_e}{D} = 340$

$$h_{c1} = 30 f \frac{V^2}{2g}$$

para el codo estándar el valor de $K_c = 30f$, obteniendo:

$$h_{c1} = 3.544 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$R_{etub2} = 30926$, obteniendo igualmente estado de flujo turbulento, por lo tanto:

$$\begin{aligned} f_{tub2} &= 8.653 \times 10^{-3} \\ h_{tub2} &= 0.678 \text{ m} \\ h_{v2} &= h_{v3} = 0.416 \text{ m} \\ h_{c2} &= h_{c3} = h_{c4} = h_{c5} = 0.0367 \text{ m} \end{aligned}$$

Reemplazando en la ec. A.13.3 los valores obtenidos y operando, se obtiene:

$$h_f = 2.155 \text{ m}$$

Reemplazando los valores correspondientes y el valor obtenido de h_f en la ecuación (A.13.2) se obtiene:

$$h_b=3.23 \text{ m}$$

siendo esta la cabeza hidráulica de la bomba P-200.

A.14. Catalogo bombas seleccionadas Pedrollo.

CP

Centrifugal pumps



PERFORMANCE RANGE

- Flow rate up to **160 l/min** (9.6 m³/h)
- Head up to **58 m**

APPLICATION LIMITS

- Manometric suction lift up to **7 m**
- Liquid temperature between **-10 °C** and **+90 °C**
(up to +40 for the version with the technopolymer impeller)
- Ambient temperature up to **+40 °C**
- Max. working pressure:
 - **6 bar** for CP 100-130-132-150-158
 - **10 bar** for CP 170-190-200
- Continuous service **S1**

CONSTRUCTION AND SAFETY STANDARDS

EN 60034-1
IEC 60034-1
CEI 2-3



CERTIFICATIONS



INSTALLATION AND USE

Suitable for use with clean water and liquids that are not chemically aggressive towards the materials from which the pump is made. As a result of their reliability and the fact that they are easy to use, these pumps are widely used in domestic and civil applications such as the distribution of water in combination with small and medium sized pressure sets, for transferring liquids and for the irrigation of gardens and allotments.

The pump should be installed in an enclosed environment, or at least sheltered from inclement weather.

PATENTS - TRADE MARKS - MODELS

- Registered Community Design n° 406160-0001

OPTIONALS AVAILABLE ON REQUEST

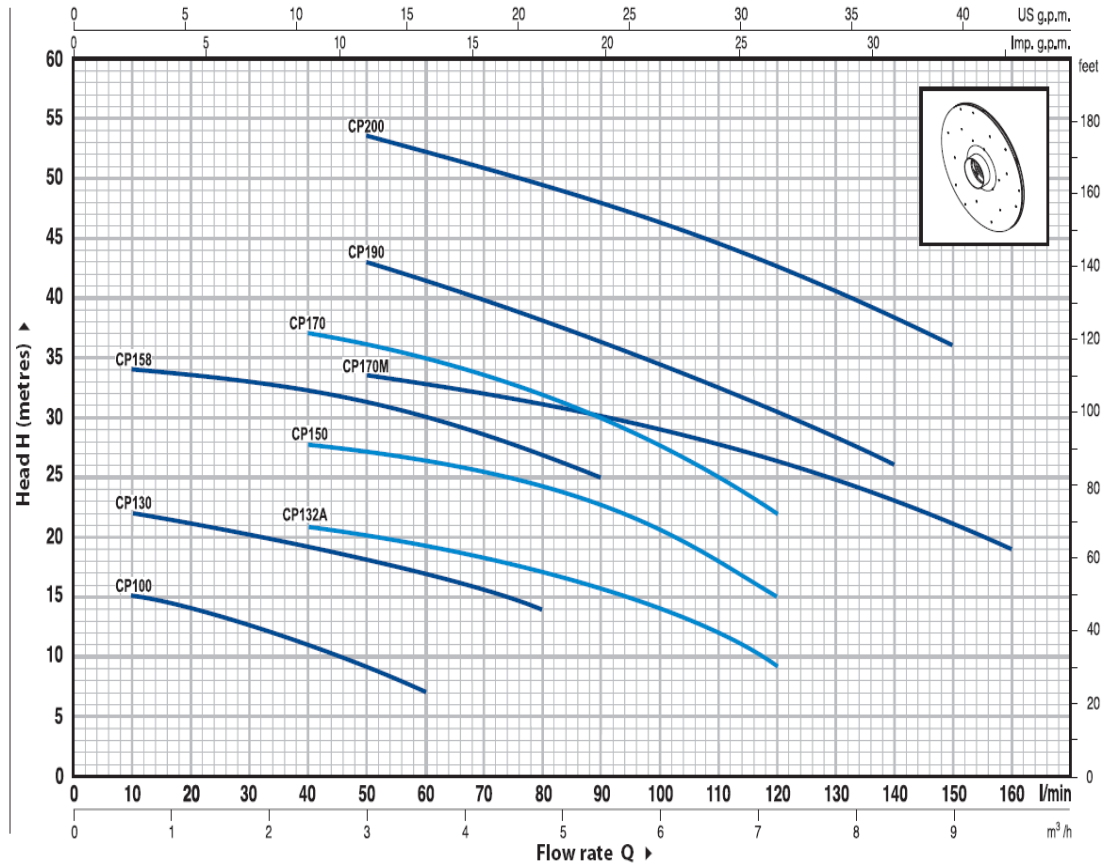
- Pump with technopolymer impeller
- Special mechanical seal
- Other voltages or 60 Hz frequency
- IP55 class protection for CP 170, CP 170M

GUARANTEE

2 years subject to terms and conditions

CHARACTERISTIC CURVES AND PERFORMANCE DATA

50 Hz n= 2900 1/min HS= 0 m

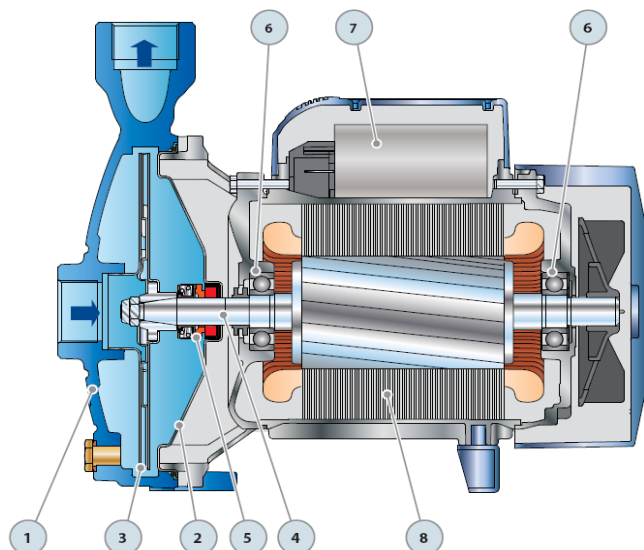


MODEL		POWER		Q																		
Single-phase	Three-phase	kW	HP		m³/h l/min	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6
CPm 100	–	0.25	0.33	H metres	16	15	14	12.5	11	9	7											
CPm 130	CP 130	0.37	0.50		23	22	21	20	19	18	17	15.5	14									
CPm 132A	CP 132A	0.60	0.85		23	–	22	21.5	21	20	19	18	17	16	14	12	9					
CPm 150	CP 150	0.75	1		29.5	–	29	28.5	28	27.5	26.5	26	24.5	23	21	18	15					
CPm 158	CP 158	0.75	1		36	34	33.5	33	32.5	31.5	30	28.5	27	25								
CPm 170	CP 170	1.1	1.5		41	–	–	38	37	36	35	33.5	32	30	27.5	25	22					
CPm 170M	CP 170M	1.1	1.5		36	–	–	35	34.5	33.5	33	32	31	30	29	28	26.5	25	23	21	19	
CPm 190	CP 190	1.5	2		50	–	–	46	44.5	43	41.5	40	38	36	34.5	32.5	30.5	28	26			
–	CP 200	2.2	3		58	–	–	55	54.5	53.5	52	51	49.5	48	46	44.5	42.5	40.5	38.5	36		

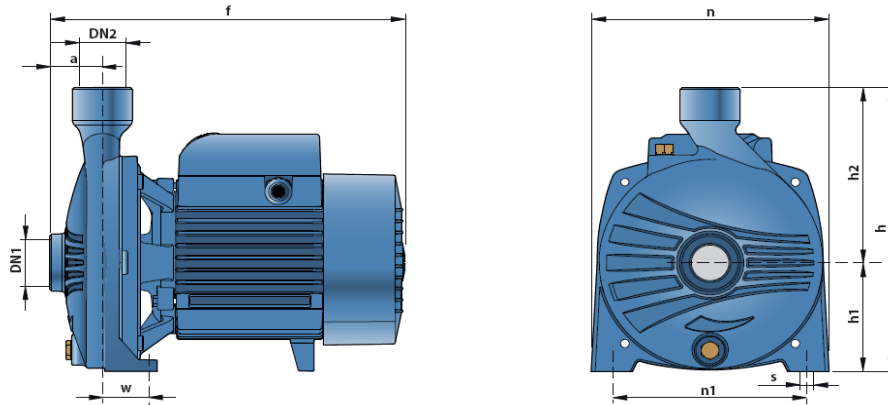
Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height

Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 App. A.

POS.	COMPONENT	CONSTRUCTION CHARACTERISTICS					
1	PUMP BODY	Cast iron, complete with threaded ports in compliance with ISO 228/1					
2	BODY BACKPLATE	Stainless steel AISI 304 (cast iron for CP 170-170M-190-200)					
3	IMPELLER	Stainless steel AISI 304					
4	MOTOR SHAFT	Stainless steel EN 10088-3 - 1.4104					
5	MECHANICAL SEAL	<i>Pump</i>	<i>Seal</i>	<i>Shaft</i>	<i>Materials</i>		
		<i>Model</i>	<i>Model</i>	<i>Diameter</i>	<i>Stationary ring</i>	<i>Rotational ring</i>	<i>Elastomer</i>
		CP 100-130-132A	AR-12	Ø 12 mm	Ceramic	Graphite	NBR
		CP 150-158	AR-14	Ø 14 mm	Ceramic	Graphite	NBR
		CP 170-170M-190-200	FN-18	Ø 18 mm	Graphite	Ceramic	NBR
6	BEARINGS	<i>Pump</i>	<i>Model</i>				
		CP 100-130-132A	6201 ZZ / 6201 ZZ				
		CP 150-158	6203 ZZ / 6203 ZZ				
		CP 170-170M	6204 ZZ / 6204 ZZ				
		CP 190-200	6304 ZZ / 6204 ZZ				
7	CAPACITOR	<i>Pump</i>	<i>Capacitance</i>				
		<i>Single-phase</i>	<i>(230 V or 240 V)</i>		<i>(110 V)</i>		
		CPm 100	10 µF 450 VL	25 µF 250 VL			
		CPm 130	10 µF 450 VL	30 µF 250 VL			
		CPm 132A	14 µF 450 VL	30 µF 250 VL			
		CPm 150-158	20 µF 450 VL	60 µF 300 VL			
		CPm 170-170M	25 µF 450 VL	60 µF 250 VL			
		CPm 190	45 µF 450 VL	80 µF 250 VL			
8	ELECTRIC MOTOR	CPm: single-phase 230 V - 50 Hz with thermal overload protector built-in to the winding.					
		CP: three-phase 230/400 V - 50 Hz.					
		⇒ Pumps fitted with the three-phase motor option offer IE2 (IEC 60034-30) class high performance					
		– Insulation: F class.					
		– Protection: IP 44.					



DIMENSIONS AND WEIGHT



MODEL		PORTS		DIMENSIONS mm									kg		
Single-phase	Three-phase	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	n	n1	w	s	1~	3~	
CPm 100	–	1"	1"	42	259	192	82	110	165	135	41	10	6.9	–	
CPm 130	CP 130					205	82	123					7.6	7.1	
CPm 132A	CP 132A					285	240	92					148	8.3	8.0
CPm 150	CP 150				285	240	92	148	190	160	38	11	12.4	11.4	
CPm 158	CP 158												12.0	11.0	
CPm 170 - 170M	CP 170 - 170M	1¼"	1"	51	367	260	110	150	206	165	44.5	11	17.8	17.2	
CPm 190	CP 190				364	290	115	175	242	206	32.5		22.3	21.3	
–	CP 200												–	22.5	

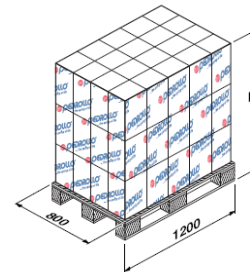
ABSORPTION

MODEL	VOLTAGE (single-phase)		
Single-phase	230 V	240 V	110 V
CPm 100	1.9 A	1.55 A	3.3 A
CPm 130	3.2 A	2.9 A	6.4 A
CPm 132A	3.5 A	3.2 A	7.0 A
CPm 150	5.7 A	5.4 A	11.4 A
CPm 158	6.0 A	5.8 A	12.0 A
CPm 170 - 170M	7.8 A	7.2 A	16.0 A
CPm 190	11.0 A	10.0 A	22.0 A

MODEL	VOLTAGE (three-phase)			
Three-phase	230 V	400 V	240 V	415 V
CP 130	2.0 A	1.2 A	1.8 A	1.1 A
CP 132A	2.9 A	1.7 A	2.4 A	1.4 A
CP 150	4.2 A	2.4 A	4.1 A	2.4 A
CP 158	4.4 A	2.5 A	4.3 A	2.5 A
CP 170 - 170M	5.2 A	3.0 A	5.1 A	2.9 A
CP 190	7.5 A	4.3 A	7.3 A	4.2 A
CP 200	9.0 A	5.2 A	8.3 A	4.8 A

PALLETIZATION

MODEL		GROUPAGE				CONTAINER			
Single-phase	Three-phase	n° pumps	H (mm)	kg		n° pumps	H (mm)	kg	
				1~	3~			1~	3~
CPm 100	–	105	1280	741	–	189	2190	1321	–
CPm 130	CP 130	105	1280	820	770	189	2190	1460	1360
CPm 132A	CP 132A	105	1280	890	860	189	2190	1590	1530
CPm 150	CP 150	70	1450	890	820	112	2240	1410	1300
CPm 158	CP 158	70	1450	860	790	112	2240	1360	1250
CPm 170	CP 170	50	1560	900	870	70	2120	1250	1200
CPm 170M	CP 170M	50	1560	940	910	70	2120	1310	1260
CPm 190	CP 190	36	1410	820	790	54	2040	1220	1170
–	CP 200	36	1410	–	830	54	2040	–	1240



A.15. Manual de operación de la planta de intercambio.

Este manual tiene como objetivo presentar el procedimiento básico para iniciar la operación de la planta piloto de intercambio térmico. A continuación se presentan los pasos a seguir antes de iniciar las prácticas en la planta:

1. Reconocer los equipos que conforman la planta.
2. Entender el diagrama de flujo y las corrientes de agua tanto de proceso (agua a 25°C aproximadamente) como del fluido energético (agua a 90 °C) que se utilizan. (ver diagrama P&ID, anexo A.1).
3. Verificar que los niveles de agua en los tanques de almacenamiento TK-300 (fluido energético) y TK-400 (agua de proceso) sean los adecuados, es decir 70 y 65 cm respectivamente. Si los tanques se encuentran vacíos o por debajo del nivel inicial, proceder a llenarlos abriendo la válvula manual de agua potable MV-500 la cual permite el paso del agua por el sistema de tratamiento (filtro de polipropileno y resina de intercambio catiónico) antes de entrar al proceso.
4. Energizar el tablero de potencia (TCE-1) que suministra la energía eléctrica a todos los dispositivos de la planta.
5. Energizar el controlador lógico programable (PLC-1) para el control de la planta de suministro y auxiliar ya que el control de dichos equipos debe ser programado en él.
6. Verificar que la presión del aire para instrumentos se encuentre entre 80 y 100 PSI.
7. Proceder a llenar con agua la pileta de la torre de enfriamiento CT-200 hasta el nivel adecuado (20 cm), para dicha operación se debe abrir la válvula de control CV-101 instalada en el intercambiador de calor y energizar manualmente la bomba P-400, hasta alcanzar dicha condición.
8. Inundar toda la línea del fluido energético, para lo cual se debe abrir completamente la válvula CV-102 instalada en el intercambiador de calor y activar manualmente la bomba P-300 hasta alcanzar esta condición, la cual puede ser verificada observando que hay flujo en la tubería de retorno.
9. Verificar el suministro de gas natural al quemador del calentador H-700, para lo cual se debe abrir la válvula manual de paso de gas MV-702.
10. Energizar el quemador de gas del calentador H-700, mediante el pulsador correspondiente ubicado en el tablero de control eléctrico (TCE-1) de la planta auxiliar.

11. Una vez la temperatura del agua en el calentador alcance los 90 °C o la temperatura que se ha establecido, energice la bomba P-300, para que todo el fluido energético alcance la misma temperatura, recirculando el mismo; apague la bomba P-300 cuando alcance dicha condición.
12. Seleccione la operación automática del PLC-1, torre de enfriamiento y calentador mediante los correspondientes selectores del tablero de control eléctrico (TCE-1) ubicado en la planta auxiliar.
13. Una vez termine este paso podrá iniciar a cablear y energizar los equipos correspondientes del área de operación del intercambiador de calor, de acuerdo a la práctica a desarrollar, esta operación se realiza en el tablero de control (TCI-1).

Parámetros de control del PLC-1

Para una correcta operación de la planta es muy importante que no se altere el programa de control del PLC-1, ya que este permite que la planta de suministro y auxiliar operen adecuadamente y en forma automática. Entre los controles que se deben implementar en estas plantas se encuentra el control On-Off para el nivel del agua en la pileta de la torre de enfriamiento, el mismo para la temperatura del calentador y el nivel del agua en los tanques tanto de agua de proceso (TK-400) como de fluido energético (TK-300).

Condiciones de seguridad

Es importante tener en cuenta que la planta de intercambio térmico presenta algunas condiciones asociadas al proceso que pueden generar algún riesgo, por lo tanto a continuación se relacionan las condiciones de seguridad a tener en cuenta.

1. Es de carácter obligatorio no presentarse en el ambiente de formación si la persona que manipulara la planta no se encuentra en buenas condiciones de salud o bajo efectos de cualquier sustancia o droga que afecte al motricidad y/o la concentración.
2. Vestir con ropa adecuada como pantalones largos, camisa con mangas y zapatos cerrados.
3. No utilizar accesorios o joyas como relojes, aretes, manillas, pulseras, cadenas o cualquier otro elemento que pueda presentar situaciones de riesgo como el hecho de quedar atrapados en los equipos de la planta.
4. Verificar el estado de los equipos y tuberías:

- Revisar el estado y aislamiento del cableado de los tableros de control
- Verificar el buen estado de los pulsadores y selectores de los tableros de control.
- Inspeccionar que se encuentren en buen estado las guardas y elementos de protección de los motores y válvulas.
- Verificar que el tubing y/o las mangueras de los instrumentos se encuentren ajustadas.
- Revisar que las tuberías y el aislamiento de las mismas se encuentren en buen estado, asegurados y sin presencia de fugas.