



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
DE LA MADERA

**“DISEÑO, DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD Y REQUERIMIENTO
DE CALOR, DE PILAS PARA EL CALENTAMIENTO DE TROZAS
PARA LA PRODUCCIÓN DE CHAPA DE PINO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
**INGENIERO EN TECNOLOGIA
DE LA MADERA**

PRESENTA:

Armando Hernández González

DIRECTOR:

Dr. David Zavala Zavala

Morelia, Michoacán, Enero 2007



EI PRESENTE TRABAJO LO DEDICO:

A mis padres: **Arnulfo Hernández García y Agustina González Trejo**, por su cariño, consejos, comprensión, apoyo moral y económico incondicional, que me han dado durante estos años.

A mis hermanos: **Yolanda, Salvador, Marisela, Rey Jesús y Marisol**, por todo su cariño y apoyo gracias.

A mis padrinos **M.V.Z. Carlos Higinio Guerrero Fuentes y Sandra Luz Cervantes**, por su apoyo moral y económico, así como sus consejos que siempre estuvieron presentes cuando más los necesite.

A mis padrinos **M.V.Z. Esteban Pelcastre Gómez y Susana Godínez**, por su apoyo moral y económico, así como sus buenos consejos que en algún momento los utilice.

A **Karely Trejo González**, por compartir conmigo momentos buenos y sobre todo por estar presente en momentos difíciles que pasé durante mi carrera.

A mi prima **Araceli Hernández González**, por su apoyo moral brindado durante mi carrera.

A mis **primos y primas** por todo el apoyo brindado durante toda mi carrera.

A mis **tíos y tías**, por sus consejos apoyo moral y económico incondicional brindado durante mi carrera.

CON AGRADECIMIENTO

A **Dios** por darme una familia tan maravillosa y permitirme estar en donde hoy estoy.

A mi asesor de tesis **Dr. David Zavala Zavala**, por su gran apoyo dedicación y orientación brindada para la realización de este trabajo.

A la empresa **Grupo “SEZARIC”**, por todo el apoyo proporcionado para la realización de este trabajo.

Al **Dr. Crisanto Covarruvias Mendoza**, profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica por su apoyo desinteresado en la realización y revisión de este trabajo.

Al **Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñónez**, profesor de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera por su orientación para la realización del presente trabajo.

Al **Ing. Juan Manuel Cesar Leal**, profesor de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera por su detallada revisión al presente trabajo.

A mis compañeros tesistas: **Erik Martínez, Fernando Vega, e Iván Tovar**, por esos buenos momentos que pasamos juntos durante la carrera y por el apoyo proporcionado en la realización del presente trabajo.

A mis amigos: **Fernando Sánchez, Jorge Villanueva, Luís Enrique Montalvo, Martín Bravo, Rodolfo Benítez**, por todos esos momentos buenos y malos que siempre pasamos juntos durante gran parte de mi carrera.

A mis compañeros **Generación 2002-2006** por ser una generación que marco historia en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

FRASES CÉLEBRES.

Gran parte de las dificultades por las que atraviesa el mundo se debe a que los ignorantes están completamente seguros, y los inteligentes llenos de dudas.

El arte imita a la naturaleza lo mejor que puede, al igual que el discípulo sigue a su maestro, por eso es una especie de Dios.

De seguro que cada minuto algo digno y generoso muere por falta de elogio.

En cada mar de problemas hay una isla llamada oportunidad.

Las mejores frutas son las que han sido picadas de los pájaros: los hombres más de bien son aquellos en quienes se ha cebado la calumnia.

Nunca debemos hablar bien ni mal de nosotros mismos. Si hablamos bien no nos creerán, y si hablamos mal nos creerán fácilmente.

La experiencia es un billete de lotería comprado después del sorteo.

Tu eres único, no ha habido, no existe hoy, ni jamás existirá alguien como tu. Y por lo tanto estas aportando algo a la humanidad.

La más hermosa de las victorias es el que nos cuesta mayor esfuerzo y nos agota hasta el cansancio

El mundo esta en manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y de correr el riesgo de vivir sus sueños.

El éxito es el premio del esfuerzo personal; sigue siempre adelante te espera un mejor futuro. El éxito es el fruto del trabajo y la grandeza para llegar a obtenerlo. El éxito se obtiene solo con el pensamiento firme y seguro de saber lo que se quiere llegar a ser.

RESUMEN

El calentamiento de la trocería a la temperatura adecuada de acuerdo a las características de las especies, es un proceso que se considera esencial para la producción de chapa de calidad. En este proyecto se definen las características de pilas para el proceso de acondicionamiento de 150 m³ de trocería de *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis* y *Pinus leiophylla*, para abastecer una demanda de 50 m³r diarios para vistas y trascaras. Como medio termoconductor se utilizará aceite térmico por serpentines, como medio de transferencia de calor a las trozas se usará agua caliente, para el control de temperaturas del agua se diseñó un sistema con termopares y sensores y para el movimiento de las trozas se utilizará una grúa viajera y un polipasto con capacidad de 5 toneladas. Para procesar el volumen en rollo señalado, se diseñaron tres pilas de calentamiento de 6.93 m de largo, 3.25 m de ancho y 5 m de altura de dimensiones interiores. Se determinó un requerimiento de energía de 589,817.4563 Kcal/hr para el suministro del calor necesario para el proceso, en un tiempo aproximado de 36 horas para lograr en el centro de las trozas una temperatura de 45 °C. El área de transferencia de energía para lograr el calor requerido es de 37 m² (67 m de tubería de fierro negro sin costura de 2" de diámetro nominal por pila de calentamiento), y para la circulación del aceite del calentador a las pilas, se utilizará una bomba con una potencia de 20 HP. Para el intercambio del agua entre las pilas se diseñó un sistema de flujo con tuberías de 2" y 1.5" de diámetro nominal, requiriendo una bomba con una potencia de 3.5 HP en un tiempo aproximado de 2.5 horas.

SUMMARY

For the production of high quality veneer, it is essential to heat the logs at the appropriate temperature according to the characteristics of the species. In this project, the vats characteristics are defined to process 150 m³ of logs of *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis* y *Pinus leiophylla*, to supply a daily demand of 50 m³ of logs for faces and backs. Thermic oil will be used as thermo conducting medium through heating coils, for the heat transfer to the logs hot water will be used, to control the temperature of the water a system with thermocouples and sensors was designed and for lifting and moving the logs to and from the vats a 5 tons traveling crane was designed. To process the log volume indicated, three vats of 6.93 m long, 3.25 m wide and 5 m high internal dimensions were designed. A requirement of 589,817.4563 Kcal/hr was defined to supply the necessary heat in about 36 hours to reach 45 °C in the pit of the logs. The heat transfer area to achieve the required temperature is 37 m² (67 m of steel black pipe joint less of 2" nominal diameter for each vat) and to move the oil from the boiler to the vats, a 20 hp pump will be used. To exchange the water among vats a flow system of 2" and 1.5" nominal diameter pipes was designed, together with a 3.5 hp pump for a 2.5 hours period.

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1. Diseño de equipo.....	3
2.2. Bombas.....	3
2.3. Válvulas.....	4
2.4. Sensores de temperatura.....	5
2.5. Generalidades del calentamiento de las trozas.....	5
2.5.1. Ventajas del calentamiento.....	5
2.5.2. Métodos de calentamiento de la madera.....	7
2.6. Factores que influyen en el acondicionamiento de la madera.....	8
2.7. Temperatura de calentamiento de las trozas.....	9
2.8. Efecto del diámetro y densidad de las trozas en el tiempo de acondicionamiento..	10
2.9. Eficiencia en el proceso de calentamiento de la madera.....	11
3. Planteamiento del problema.....	13
4. Objetivos.....	14
5. Metodología.....	15
5.1. Pilas de calentamiento.....	15
5.1.1. Dimensiones.....	15
5.1.2. Diseño constructivo.....	15
5.2. Sistema de transferencia de calor.....	16
5.2.1. Requerimiento de calor para el proceso de ablandamiento.....	16
5.2.2. Diseño de los serpentines para la transferencia de calor.....	16
5.2.3. Potencia de la bomba para el suministro de aceite térmico.....	17
5.3. Sistema de flujo para el movimiento del agua entre pilas.....	17
5.3.1. Potencia de la bomba.....	17
5.3.2. Diseño del flujo de agua.....	17
5.4. Control de temperaturas del proceso de ablandamiento.....	18
5.5. Sistema de transporte de las trozas.....	18
5.6. Costo de las pilas de calentamiento.....	18

6. Análisis de resultados.....	19
6.1. Pilas de calentamiento.....	19
6.1.1. Dimensiones.....	19
6.1.2. Diseño constructivo.....	20
6.2. Sistema de transferencia de calor.....	25
6.2.1. Requerimiento de calor para el proceso de ablandamiento.....	25
6.2.1.1. Cantidad de energía necesaria para calentar 150 m ³ r de madera.....	25
6.2.1.2. Cantidad de energía requerida para calentar los muros de las pilas de ablandamiento.....	27
6.2.1.3. Cantidad de energía necesaria para calentar el agua del proceso de ablandamiento de trocería.....	30
6.2.1.4. Transferencia de calor en los muros.....	32
6.2.1.5. Pérdidas de calor por evaporación.....	33
6.2.1.6. Cantidad de calor necesario para el proceso de ablandamiento de la trocería.....	35
6.2.2. Diseño de los serpentines para la transferencia de calor.....	37
6.2.3. Potencia de la bomba para el suministro de aceite térmico.....	40
6.3. Sistema de flujo para el movimiento del agua entre pilas.....	48
6.3.1. Potencia de la bomba.....	48
6.3.2. Diseño del flujo del agua.....	58
6.4. Control de temperaturas del proceso de ablandamiento.....	59
6.5. Sistema de transporte de las trozas.....	60
6.6. Costo de las pilas de calentamiento.....	61
7. Conclusiones.....	62
8. Recomendaciones.....	63
9. Bibliografía.....	64
10. Anexos.....	67

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Dimensiones exteriores e interiores de las pilas de calentamiento.....	20
Figura 2. Corte transversal mostrando las dimensiones generales en altura y espesor de muros.....	20
Figura 3. Detalle de la cimentación.....	21
Figura 4. Desplante de la cimentación.....	21
Figura 5. Detalles de refuerzos en muros y pisos.....	22
Figura 6. Refuerzos del muro y nivel del suelo.....	22
Figura 7. Pisos terminados y levantamiento de muros.....	23
Figura 8. Emparrillado de los muros.....	23
Figura 9. Vista de la obra civil concluida.....	24
Figura 10. Pilas de calentamiento con agua para la detección de filtraciones.....	24
Figura. 11. Demanda de calor para el proceso de ablandamiento de 150 m ³ r.....	36
Figura 12. Diseño de los serpentines de calor y flujo del aceite térmico.....	40
Figura 13. Diseño del flujo del agua para el intercambio del agua entre pilas.....	58
Figura 14. Conexión de la tubería de 2 pulgadas a la entrada bomba.....	58
Figura 15. Conexión de la tubería para el intercambio del agua entre pilas.....	59
Figura 16. Esquemas de conexión de válvula, del actuador, controlador y de los sensores.....	59
Figura 17. Esquema de ubicación de la grúa viajera y el puente.....	60
Figura 18. Esquema de ubicación de las columnas que soportan la Grúa viajera.....	61

INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1 Características y masas de la trocería.....	26
Cuadro 2. Cantidad total de energía requerida para el calentamiento de la trocería.....	27
Cuadro 3. Área total de los elementos de construcción.....	28
Cuadro 4. Masa de los elementos de construcción (paredes y pisos).....	29
Cuadro 5. Cantidad total de energía requerida para el calentamiento de las pilas de ablandamiento.....	30
Cuadro 6. Cantidad de energía requerida para calentar el agua del proceso.....	31
Cuadro 7. Pérdida de calor a través de los muros y pisos.....	33
Cuadro 8. Pérdida de calor por evaporación.....	34
Cuadro 9. Calor total requerido para el proceso de ablandamiento de los 150 m ³ r.....	35
Cuadro 10. Número de Nusset.....	37
Cuadro 11. Área mínima de transferencia de calor del los serpentines.....	39
Cuadro 12. Gasto másico de aceite térmico.....	40
Cuadro 13. Gasto volumétrico.....	41
Cuadro 14. Velocidad lineal del aceite térmico en el sistema.....	42
Cuadro 15. Número de Reynolds para el sistema de aceite térmico.....	43
Cuadro 16. Longitud equivalente para los accesorios.....	45
Cuadro 17. Pérdida de carga por fricción en la tubería recta.....	46
Cuadro 18. Altura dinámica.....	47
Cuadro 19. Gasto volumétrico del agua.....	49
Cuadro 20. Velocidad lineal del fluido.....	49
Cuadro 21. Número de Reynolds para el sistema de flujo de agua.....	50
Cuadro 22. Pérdidas de fluidez por reducción a la entrada de la tubería y por reducción de la tubería de 2 pulgadas.....	51
Cuadro 23. Pérdidas de fluidez por aumento en las tuberías de 1.5”.....	52
Cuadro 24. Pérdidas de fluidez por ensanchamiento a la salida de la tubería.....	52
Cuadro 25. Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta.....	54
Cuadro 26. Pérdidas de energía por fricción en válvulas y accesorios.....	55

Cuadro 27. Pérdida total de energía por fricción en el sistema.....	56
Cuadro 28. Balance de energía en el sistema de bombeo para el intercambio del agua entre pilas.....	57
Cuadro 29. Potencia de la bomba.....	57
Cuadro 30. Costo de las pilas de ablandamiento.....	61

INDICE DE ANEXOS.

Anexo 1. Calor específico de diversos líquidos y sólidos.....	67
Anexo 2. Densidad de diversos materiales.....	68
Anexo 3. Relación entre la presión de vapor de agua, la temperatura ambiente y la humedad relativa.....	69
Anexo 4. Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica.....	70
Anexo 5. Viscosidades de gases y líquidos en función de la temperatura a 1 atm.....	71
Anexo 6. Factor de fricción para fluidos en tuberías.....	72
Anexo 7. Pérdidas por fricción, número de cargas de velocidad K_f	73
Anexo 8. Dimensiones de tuberías de acero.....	74
Anexo 9. Propiedades termofísicas de fluidos saturados.....	75
Anexo 10. Longitudes equivalentes expresadas en metros de tubería rectilínea.....	76
Anexo 11. Dimensiones generales de los serpentines.....	77
Anexo 12. Diagrama de la tubería para la extracción de agua de las pilas de calentamiento.....	78
Anexo 13. Corte B,B' dimensiones generales del flujo de aceite térmico y flujo del agua.....	79
Anexo 14. Corte transversal de las pilas de calentamiento.....	80
Anexo 15. Diagrama del sistema de control de temperatura.....	81
Anexo 16. Dimensiones del sistema de cabezales y sistema de reflujo de aceite térmico...82	
Anexo 17. Vista aérea del sistema de reflujo y cabezales.....	83
Anexo 18. Vista 3D del reflujo de aceite térmico y cabezales.....	84
Anexo 19. Características técnicas del sistema de transporte de trocería.....	85

1. INTRODUCCION

En la producción de chapa, el calentamiento de las trozas es una fase que se considera esencial para la optimización del proceso de producción de chapa generada en cuanto a calidad y volumen, por la facilidad de corte que se obtiene al plastificar la madera mediante calor. La optimización de este proceso esta relacionada con las características de las especies de pino procesadas, las temperaturas del medio termoconductor y los periodos de tiempo de calentamiento utilizados para las trozas. Fiel and Godin (1975).

Previamente al corte para la obtención de chapa, por lo general la madera se somete a un proceso de ablandamiento mediante calor, el cual es suministrado con agua caliente en pilas que pueden ser del tipo intermitentes o continuas o cámaras de vapor; que puede incluir inyección de vapor y la cámara con rociado de agua caliente con una atmósfera de vapor. Fiel and Godin (1975).

El calentamiento de las trozas además de manifestar un mejoramiento en las características de la chapa (tersura, facilidad de corte, etc.), evidentemente también se ve reflejado en un menor desgaste del filo de las cuchillas, reducción en el consumo de energía motriz del torno, menor cantidad de pegamento en la formación del triplay, así como una disminución en el desperdicio de la madera en chapa tersa por el efecto de lijado.

Con frecuencia los procesos de acondicionamiento varían de una fábrica a otra, aun cuando se utilicen equipos similares y se procesen las mismas especies, lo que refleja un desconocimiento del manejo de la manipulación de las variables que determinan el calentamiento de las trozas. Zavala (1991)

El tiempo de calentamiento requerido para lograr la temperatura óptima de corte de la madera, depende de los siguientes factores: El sistema de calentamiento empleado, las características de las pilas de agua caliente y de las cámaras de vapor, las características de las trozas, específicamente la densidad de la madera, el diámetro de las trozas, las dimensiones de los cuadrados y el contenido de humedad de la madera. Zavala (1991)

En el presente trabajo se determinó que para el proceso de acondicionamiento de 150 m³ de trocería, será necesario construir tres pilas de calentamiento de 6.93 m de largo, 3.25 m de ancho y 5 m de altura de dimensiones interiores, con un suministro de energía de 589,817.4563 Kcal/hr para el desarrollo del proceso en un tiempo aproximado de 36 horas. Para lograr una temperatura de 45 °C al centro de la troza se definió un área de transferencia de energía de 43.95 m², utilizando una bomba con una potencia de 20 HP para el suministro del gasto de energía requerido para el proceso. Para el intercambio del agua entre las pilas se diseñó un sistema de flujo con tuberías de 2" y 1.5" de diámetro nominal, requiriendo una bomba con una potencia de 3.5 HP. Para el control de temperaturas del agua se determinó utilizar un sistema con termopares y sensores y para el movimiento de la trocería, una grúa viajera y un polipasto con capacidad de 5 toneladas.

2. ANTECEDENTES

2.1. Diseño de equipo.

En el diseño de un equipo de producción industrial los equipos que pueden estar incluidos en el proceso son recipientes a presión (si es el caso), tubería, bombas y válvulas. En los equipos sujetos a presión se debe de tomar en cuenta las diversas cargas a las cuales estarán sujetos, ya que tales fuerzas provocan diferente intensidad en los componentes del recipiente. Megyesy (1992), citado por Ambriz (2002)

2.2. Bombas.

La necesidad de bombear los fluidos surge de la necesidad de transportarlos de un lugar a otro a través de ductos o canales. El movimiento de un fluido a través de ductos o canales se logra por medio de una transferencia de energía. Los medios comúnmente empleados para lograr flujos de fluidos son la gravedad, el desplazamiento, la fuerza centrífuga, la fuerza electromagnética, la transferencia de cantidad de movimiento, el impulso mecánico, o combinaciones de estos. Robert y James (1992)

Pull (1992), citado por Ambriz (2002), señala que una tubería es un elemento que conduce cualquier fluido. Tal conducción se da cuando se tiene una presión más alta al inicio que al final de la tubería. El flujo de la sustancia que circula es función de la diferencia de presiones, del diámetro de la tubería, de la dirección de los codos, válvulas y otros accesorios. El cálculo de los diámetros de las tuberías se realiza en base a la velocidad de las sustancias a transportar.

Viejo (1990), citado por Ambriz (2002), señala que la selección de las bombas a utilizar en un determinado proceso, se basa en el tipo de fluido a transportar ya que una bomba es un equipo que recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico o térmico y la convierte en energía cinética generando una diferencia de presión entre dos puntos, de posición o de velocidad. De tal manera que cada elemento constitutivo de la bomba será de acuerdo al tipo de sustancia y la cantidad de la misma.

Robert y James (1992), señalan que al seleccionar una bomba para cualquier servicio, es necesario saber que liquido se va a manejar, cual es la carga dinámica total, las cargas de succión y descarga, y en la mayor parte de los casos la temperatura, la viscosidad, la presión de vapor y la densidad relativa.

2.3. Válvulas

Para la regulación del flujo en una tubería se utilizan las válvulas, existen variados diseños como las necesidades del proceso. Estas válvulas pueden ser de accionamiento hidráulico o mecánico. Con las válvulas, además de regular el gasto, también se protege la conducción, ya que existen dispositivos de seguridad en caso de que ocurra un daño ó avería en la conducción. Viejo (1990), citado por Ambriz (2002)

Viejo (1970), señala que los aspectos más importantes de la conducción son:

- El diseño de la tubería para una conducción de carga y caudal, así como el tipo de esfuerzos originados por ciertas cargas adicionales.
- El anclaje que se debe de proporcionar en los cambios de dirección de la conducción.
- La selección del tipo de válvulas que se desea emplear en cada caso.

Para el cálculo de pérdida de energía por conducción este autor la clasifica en:

1. Perdidas menores o locales, son aquellas que ocurren en una zona definida de la conducción y que son originadas por válvulas, cambios de dirección, ampliaciones o reducciones, entradas o salidas.
2. Perdidas mayores o de fricción. son las que crecen linealmente con el desarrollo de la conducción y se deben al rozamiento de las partículas del líquido entre sí o con paredes de la tubería.

2.4. Sensores de temperatura.

La temperatura, junto con el flujo, son las variables que con mayor frecuencia se miden en los procesos industriales, debido a que afecta a casi todos los fenómenos físicos. La temperatura se utiliza frecuentemente por inferir en otras variables del proceso Smith y Corropio (1999)

Los mismos autores clasifican a los sensores de medición de temperaturas de la siguiente manera:

- 1 Termómetro de expansión
 - 1.1 Termómetro de líquido en vidrio
 - 1.2 Termómetro de expansión de sólidos (tira bimetalica)
 - 1.3 Termómetro de sistema lleno (termómetros a presión)
- 2 Dispositivos con sensor de resistencia
 - 2.1 Termómetros de resistencia
 - 2.2 Termisores
- 3 Termopares
- 4 Métodos sin contactos

2.5. Generalidades del calentamiento de las trozas.

2.5.1. Ventajas del calentamiento.

El proceso de ablandamiento o calentamiento de la madera previamente a su corte para la producción de chapa, se considera necesario para especies duras o de alta densidad, de grano irregular o con veteado pronunciado, en maderas resinosas donde puede interferir la resina con otras fases de preparación de la chapa y la producción del tablero, y cuando se desea producir chapa con espesores mayores de 3.2 mm (1/8 plg), que de no estar calentada se generarían grietas pronunciadas y pérdidas excesivas de material. (Fleischer 1959; Lutz 1974; citados por Zavala 1997).

Sellers (1985), señala que el calentamiento de las trozas para chapa de pino del sur de la Unión Americana se realiza generalmente con vapor o con agua caliente, con la finalidad de reducir el severo desafilado de las cuchillas, para ablandar los nudos y para reducir la aspereza de la chapa generada; también reconoce la tendencia del uso de agua caliente en lugar de las cámaras de vapor.

El mismo autor describe algunos datos que justifican el capital económico invertido en el equipo:

1. Mejorar la calidad de la superficie de la chapa para el encolado, reduciendo así el consumo de adhesivo.
2. Reducir la variación de espesores que son criterios y de gran importancia para la unión entre madera y adhesivo.
3. Incrementar la recuperación de chapa de calidad.
4. Aumentar la calidad de la chapa generada de un 10 a 20% respecto a su volumen.

(Lutz, op cit 1960 y 1978; Palka 1974; Kollman y Kuenzi 1975, citado por Zavala y Trujillo 1993), señalan que con el acondicionamiento de las trozas mediante calor antes de la producción de chapa, se logra plastificar las fibras obteniéndose las siguientes ventajas:

- Reducción de las perdidas por rajaduras debido a la producción de chapa compacta.
- Reducción de la profundidad de grietas durante el torneado de la chapa.
- Menor desgaste del filo de las cuchillas debido al ablandamiento de los nudos y de la madera de verano.
- Reducción del consumo de energía motriz del torno por la facilidad de corte.
- Reducción de la cantidad de pegamento por una mayor tersura de la chapa o grietas menos profundas.
- Menor desperdicio de madera en chapa tersa por efecto del lijado.

2.5.2. Métodos de calentamiento de la madera.

El calentamiento de las trozas se puede hacer en pilas de calentamiento o en cámaras de vapor. En pilas o fosas se derivan tres métodos: pilas de agua para sumergir las trozas, pilas cerradas para trozas flotantes y pilas sin tapas para trozas flotantes. (Fiel y Godin1975; Steinhagen 2005; Flescher 1959).

Los mismos autores señalan que las pilas de agua para trozas sumergidas son de tipo intermitente en donde las trozas se colocan en la pila vacía, dirigidas las trozas hacia abajo por medio de cadenas y sumergidas en agua. También mencionan que en este tipo de pilas el agua es mas caliente en la parte superior que la parte del fondo a menos de que se agite, pudiendo utilizar para este propósito burbujeadores de aire. Ventajas y desventajas de este sistema de calentamiento:

Ventajas

- La temperatura de la pila puede ser controlada.
- El condensado o agua caliente se puede regresar a la caldera.
- Las trozas se calientan en forma uniforme lográndose con la agitación del agua.

Desventajas

- No se usa en operaciones continuas.
- Riesgo de seguridad (que los trabajadores caigan al agua caliente).
- Se debe vaciar el agua de la pila para remover las trozas.
- El agua caliente se debe enfriar parcialmente antes de ser bombeada a otra pila.
- Es un método inicialmente costoso.
- El agua calienta a las trozas en un 5 a 10% más lento que el vapor.

El calentamiento de trozas por medio de cámaras de vapor puede incluir las siguientes modalidades: la cámara con inyección de vapor, la cámara con agua caliente con una atmósfera de vapor y la cámara con rociado de agua caliente con una atmósfera de vapor.

Cámara de Vapor: Es una cámara en la cual las trozas son apiladas en una atmósfera saturada caliente. Esta humedad se obtiene por medio de inyección directa de vapor.

Ventajas

- Menos riesgo para los trabajadores por caídas en el agua caliente de las pilas.
- Facilidad de carga y descarga.
- En el caso del método con rociado de agua caliente no se manifiestan problemas serios de contaminación.

Desventajas

- Es una operación tipo intermitente.
- En el caso del método de inyección de vapor produce mucho vapor condensado, que si se drena puede contaminar ríos y lagos por su bajo pH.

2.6. Factores que influyen en el acondicionamiento de la madera.

Fiel y Godin (1975), indican que son siete las variables que determinan el tiempo de calentamiento de las trozas, de los cuales tres están relacionadas con las pilas:

- pilas de agua caliente o de inyección de vapor.
- temperatura del agua en la pila
- periodo de calentamiento de la trocería

Los otros cuatro factores se relacionan con las trozas: temperatura de las trozas antes del calentamiento, temperatura de la troza requerida en el torno, diámetro de la troza y su densidad verde.

Fleischer (1959), señala que las variables principales que deben de ser considerados en el calentamiento de las trozas son: el tipo de calentamiento, las diferencias de contenido de agua en la madera, la dirección del grano de la madera y la densidad de la misma. En especies duras la temperatura que da lugar a un buen corte esta relacionada con su densidad.

2.7. Temperatura de calentamiento de las trozas.

La temperatura de corte de la madera generalmente se logra sometiéndola a un proceso de calentamiento, cuya eficiencia depende del medio termoconductor empleado y de las características de las especies procesadas, destacando el diámetro o dimensiones de las trozas, la densidad y el contenido de humedad de la madera (Lutz *et al.*, 1967; Lutz y Patzer 1976; Walter 1974, citado por Zavala 1997).

Zavala (1991), señala que para el área metropolitana del D.F., el procedimiento más utilizado para el ablandamiento de la trocería es por medio de tanques. De las cuales el 85 % utilizan vapor como fuente de transferencia de calor para calentar el agua y un 15 % utilizan aceite térmico. También señala que el aceite térmico tiene mejores características de calentamiento que el vapor y menor tiempo de recuperación de su temperatura. Las secuelas de ablandamiento para pino en estas industrias con un sistema de aceite térmico son: temperaturas de 80 °C a 90 °C con un tiempo de calentamiento de 72 hrs. Señala la necesidad de mejorar el proceso de transferencia de calor hacia las trozas.

Moreno y Espejel (1983) citado por Ruiz (2002), indican que el rango de temperaturas del agua observado en los tanques de acondicionamiento de la compañía forestal de Chiapas es de 60 a 80 °C, variando el diámetro de las trozas.

Peter (1974), señala que los tiempos de calentamiento de las trozas bajo condiciones reales en una fábrica de Georgia-Pacific's Springfield, Oregon, a una temperatura del agua de 180 °C y a una temperatura de 100 °C a 2.25 pulgadas del centro de la troza para *Abeto Douglas*, se requirieron los tiempos en horas indicados en el siguiente cuadro para los diámetros señalados.

Diámetro de la troza (pulgadas)	Tiempo (horas)
12	3
16	7
20	14
24	21
28	28
32	36
36	48

2.8. Efecto del diámetro y densidad de las trozas en el tiempo de acondicionamiento.

En el proceso de calentamiento de la madera mediante inmersión en agua, las temperaturas y los tiempos requeridos varían en función de las dimensiones de las trozas.

Fleischer (1959), señala que en cualquier especie se puede obtener un buen corte generalmente sobre una amplia gama de temperaturas. Además menciona que las maderas de baja densidad (0.40 gr/cm^3) se pueden cortar bien a una temperatura ambiente; Las de densidad media (0.46 gr/cm^3), obtienen su mejor corte a 60°C (140°F).

Feihl y Godin (1975), establecen como regla general, que el tiempo de calentamiento aumenta 4 veces cuando el diámetro de las trozas se duplica ($2 \times 2 = 4$) y nueve veces cuando el diámetro se triplica ($3 \times 3 = 9$) y así sucesivamente; por ejemplo, si una troza de 30 cm (12 plg) requiere 10 h; una de 46 cm (18 plg) requiere $22 \frac{1}{2}$ h; una de 60 cm (24 plg) requiere de 40 h; una de 76 cm (30 plg) requiere de 62 hrs, etc. Indican además que se requiere más tiempo para calentar una troza de alta densidad que una de baja densidad, estableciendo que la madera de diferentes especies con densidad anhidra similar, pero con densidad verde diferente, las de mayor densidad verde requieren de mayores tiempos de calentamiento.

Zavala y Trujillo (1993), señalan que las maderas de alta densidad requieren de mayores tiempos de calentamiento respecto a las maderas de menor densidad, reportando como resultado de su trabajo un tiempo de acondicionamiento para pino de 32.5 hrs, para lograr una temperatura de 40 °C que se considera la optima para obtener chapa de buena calidad en pino. Además, indican que es necesaria la instalación de un sistema automático de control de temperatura del agua de condicionamiento, mediante válvulas reguladoras del flujo de aceite térmico a los tanques de calentamiento, conectada a un termostato eléctrico digital programable.

2.9. Eficiencia en el proceso de calentamiento de la madera.

La madera es un material anisotrópico, por lo que su conductividad térmica es diferente en sus direcciones, radial, tangencial y longitudinal, esta misma conductividad térmica se ve afectada por la acidez en los tanques de acondicionamiento de las trozas.

Kollmann (1959), señala que el coeficiente de conductibilidad calorífica interna es una constante de la madera que también depende de la dirección del flujo del calor, de la temperatura y del grado de humedad de dicho material.

Balwin (1981) citado por Ruiz (2002), establece que el movimiento de calor en la troza es mejor si la madera esta húmeda, ya que el agua es un vehiculo que sirve de ayuda para mover el calor hacia el centro de la troza.

Mortensen (1974) señala que una de las características de los tanques de acondicionamiento es la alta acidez del agua por el continuo uso del líquido (pH 3.5), limitando la transferencia de calor y fragilidad de las fibras ocasionando que se rompan, además de rajaduras en el torno. Lo anterior lo fundamenta en que la lignina y las hemicelulosas son termoplasticas, por lo que se suavizan por medio de calor, y cuando la troza se calienta solamente el 50% (lignina) se suavizan y la única manera de calentar el otro 50% (celulosa acida), es agregando al agua soluciones alcalinas para ajustar el pH.

Zavala, comunicación personal citado por Ruiz (2002) y Sellers (1985), señalan que cuando se usan pilas de agua caliente para el acondicionamiento de trozas, el agua lixivia químicos de las trozas, así como residuos de corteza, reduciendo el pH del agua (pH ácido menor de 7). Establece que para mejorar el proceso de calentamiento en pilas de agua caliente, algunas fábricas emplean productos químicos como hidróxido de sodio al 50% en peso (NaOH) u otro producto alcalino para ajustar el pH del agua (pH de 7), desfasado hasta por de bajo de un pH de 3.5, con la finalidad de aumentar la penetración del agua en las trozas y para facilitar la transferencia de calor al interior de la madera.

Martin y Gray (1971), citado por Ruiz (2002), determinaron un rango en los valores de pH de 3.1 a 3.8 y con muy poca diferencia en los pinos. Esta acidez limita aun mas la eficiencia del calentamiento, además de que obstaculiza la transferencia de calor entre la superficie de la madera y el agua, ocasionando tiempos de acondicionamientos mas prolongados.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El presente trabajo surge de la necesidad de producir chapa de mejor calidad en la fábrica de triplay de la empresa “SEZARIC” en Santiago Papasquiaro, Durango. Contemplándose como una alternativa para lograr este objetivo la implementación de un sistema de ablandamiento de trocería para lo cual se requiere diseñar una pila de calentamiento de trozas con la capacidad optima definida por el volumen en rollo procesado diariamente (50 m^3 rollo de vistas y trascaras), adicionalmente se requiere determinar las características de los serpentines y definir la forma de automatización de los controladores de flujo y el control de temperatura.

4. OBJETIVOS.

- Diseñar pilas de calentamiento, para una capacidad de 150 m³ rollo para la producción de chapa torneada.
- Determinar las dimensiones de las pilas de calentamiento para el volumen indicado.
- Determinar el requerimiento de calor necesario en todo el sistema para acondicionar las trozas a una temperatura aproximada de 45 °C en el centro de la troza.
- Determinar el caudal de agua para su abastecimiento a las pilas de calentamiento y determinar la capacidad de la bomba para cambiar el agua entre las pilas.
- Diseñar el sistema de intercambiadores de calor a base de aceite térmico y determinar la capacidad de la bomba para la recirculación del aceite térmico entre la caldera y los serpentines.
- Determinar los costos de la construcción de las pilas de calentamiento integrando el costo de las bombas, serpentines, obra civil, controladores automáticos y mano de obra.

5. METODOLOGIA.

Para la realización del presente proyecto, se contemplaron conceptos que incluyeron la definición de las dimensiones de las pilas de calentamiento y su diseño constructivo; se realizaron cálculos para el diseño de los intercambiadores de calor y la capacidad de la bomba para el suministro de aceite térmico; se diseñó el flujo del agua entre pilas, y se calculó la capacidad de la bomba para intercambiar el agua; se seleccionó el sistema de control de temperatura a emplear en el proceso; el sistema de transporte de trocería y finalmente se determinó el costo de las pilas de calentamiento.

5.1. Pilas de calentamiento.

5.1.1. Dimensiones.

Las pilas para el calentamiento se diseñaron para una capacidad de 150 m³ rollo, volumen de madera que satisface a una demanda de 50 m³ diarios de trocería para vistas y trascaras en la fábrica de triplay (Grupo “ZESARIC”), ubicada en la ciudad de Santiago Papasquiaro, Durango.

Las pilas de calentamiento se diseñaron en función de las dimensiones de las trozas y el volumen de madera en rollo para vistas y trascaras que se requiere procesar diariamente, considerando el coeficiente de apilamiento que presentó la madera en rollo.

5.1.2. Diseño Constructivo.

Cimientos. Se construyeron tres cimientos con zapatas corridas de 22 x 0.8 m de base, 30 cm de peralte con concreto premezclado y a una profundidad de 50 cm, reforzados con una parrilla de varilla corrugada de 5/8” de grosor a cada 30 cm, en la base de las zapatas se colocaron varillas de 1/2” a cada 10 cm de espaciamiento. El concreto se preparó con una proporción de 4:5:1.5:1 de arena, grava, agua y cemento respectivamente, con un factor de resistencia en concreto de 200 kg/cm². Los cimientos se construyeron de manera que terminaran a una altura

aproximada de 20 cm del nivel de piso, sobre los que se colocarán las trozas, además de que funcionaran como protección para los serpentines.

Pisos. Se construyeron con dimensiones de 6.93 x 3.25 m y un grosor de 20 cm con concreto premezclado, reforzados con una parrilla de varilla corrugada de 3/8" de grosor a cada 30 cm de espaciamiento, además de que se colocó varilla de 1/2" de 2 m de longitud del centro hacia los costados de la pila con un espaciamiento de 30 cm intercalado en la parrilla. El concreto se preparó con una proporción de 4:5:1.5:1 de arena, grava, agua y cemento respectivamente, con un factor de resistencia en concreto de 200 kg/cm².

Muros. Los muros de las pilas de calentamiento se construyeron de 22 m de longitud con concreto premezclado, con dos divisiones de 3.25 m, dos muros de 3.85 m de longitud y con un espesor de pared de 30 cm, reforzadas con una doble parrilla de varilla corrugada de 5/8" de grosor a cada 30 cm de espaciamiento y varilla de 1/2" de diámetro a cada 90 cm. El concreto se preparó con una proporción de 3:4:1.25:1 de arena, grava, agua y cemento respectivamente, el factor de resistencia del concreto fue de 250 kg/cm².

5.2. Sistema de transferencia de calor.

5.2.1. Requerimiento de calor para el proceso de ablandamiento.

Los requerimientos de calor necesario para el proceso de ablandamiento se calcularon tomando en cuenta las demandas de energía para calentar 150 m³ de madera en rollo, los muros y los pisos de las pilas, la energía requerida para calentar el agua que se utilizará en el proceso de ablandamiento de las trozas, la pérdidas de energía por conducción a través de las paredes de las pilas y la pérdida de calor que se pierde por evaporación.

5.2.2. Diseño de los serpentines para la transferencia de calor.

Para el diseño de los serpentines de calor se determinó primeramente el coeficiente global de transferencia de calor por medio de la ecuación correspondiente (Incropera, 1999),

posteriormente, en función de la cantidad total de energía calorífica necesaria para el proceso de ablandamiento de las trozas, la temperatura del aceite térmico, la temperatura deseada para el agua del proceso y el coeficiente global de transferencia anteriormente calculado, se definió el área mínima de transferencia de calor para el proceso, por medio de la ecuación general de transferencia de calor (Kern, 1974).

Los serpentines se integraron con tubo liso de fierro negro (sin costura) de 60.33 mm (2.375 plg) de diámetro exterior, cedula 40 y como cabezales se utilizó tubo liso de fierro negro de 4.5” de diámetro exterior, cedula 40. Para la transferencia de calor se diseñó un serpentín con un haz de 3 tubos con 6 retornos por pila.

5.2.3. Potencia de la bomba para el suministro de aceite térmico.

La determinación de la potencia de la bomba se realizó en función del gasto volumétrico de aceite térmico ($40.62 \text{ m}^3/\text{hr}$) y de las distintas pérdidas de energía que el fluido presentará durante su conducción, por medio de la fórmula general de balance de energía (Viejo, 1975).

5.3. Sistema del flujo para el movimiento de agua entre pilas.

5.3.1. Potencia de la bomba.

La potencia de la bomba se determinó en función del volumen de agua que se requiere mover entre las pilas, el tiempo estimado para su extracción y de las distintas pérdidas de energía que experimente el fluido durante su conducción, por medio de la fórmula general de balance de energía mecánica (Geankoplis, 1998).

5.3.2. Diseño del flujo del agua.

Para el suministro y extracción del agua entre las pilas, se consideró que la distancia de flujo sea la mínima. Se utilizó tubo de acero de 60.33 mm (2.375 pulg) de diámetro exterior, cedula 40, para el flujo de la extracción del agua de las pilas de calentamiento hacia la bomba.

Para el suministro del agua a las pilas se utilizó tubería de 48.36 mm (1.900 pulg) de diámetro exterior, cedula 40, que posteriormente se conectaron a la tubería de 60.33 mm (2.375 pulg).

5.4. Control de temperaturas del proceso de ablandamiento.

Para el control de las temperaturas se utilizaron dos válvulas de esfera con las que se regula el flujo del aceite térmico, con accionadores neumáticos de $\frac{1}{4}$ de vuelta, controlados por una válvula neumática accionada por una solenoide comandada por un controlador de temperatura. Para medir la temperatura se utilizó una sonda tipo PT100 (de acuerdo a la clasificación de Smith y Corropio (1999), esta sonda pertenece al grupo de los termopares). Se diseñó un sistema de reflujo del aceite en el área donde se colocarían las válvulas.

5.5. Sistema de transporte de las trozas.

Se definió que el transporte de las trozas se diera en sentido horizontal y vertical, a través de una grúa puente para el movimiento horizontal y para el levantamiento de la carga se utilizó un polipasto, que puede moverse a lo ancho del puente y el puente a lo largo de la estructura.

5.6. Costo de las pilas de calentamiento.

El costo de las pilas de ablandamiento se determinó integrando el costo de los materiales empleados para la obra civil, los precios de los equipos para el movimiento del aceite y del agua de las pilas y los costos de la mano de obra de los diferentes conceptos señalados.

6. ANALISIS DE RESULTADOS.

El análisis de resultados se integró con la información derivada de la construcción de la obra civil, del diseño e instalación del sistema de calentamiento y con el sistema de intercambio del agua entre pilas.

6.1. Pilas de calentamiento.

6.1.1. Dimensiones.

Las dimensiones de las pilas se determinaron en función de la longitud de las trozas, el volumen a procesar y el coeficiente de apilamiento de las trozas que se procesan diariamente para vistas y trascaras.

Coeficiente de apilamiento de la trocería. Para definir la longitud y la altura de las pilas de calentamiento, primeramente se determinó el coeficiente de apilamiento de la trocería, este concepto se refiere al volumen real que ocupa la trocería en un espacio determinado. El coeficiente de apilamiento se determinó en el área de recepción de la trocería, a partir de una pila de trozas, a esta muestra se le definió una figura geométrica y se determinó el espacio ocupado por las trozas en función de su diámetro, obteniéndose un coeficiente de apilamiento del 70%.

Ancho de las pilas de calentamiento. Para determinar el ancho de las pilas se consideró la longitud de las trozas que se utilizan en el proceso de torneado para la producción de chapa, que en este caso fue de 2.60 m (8' - 6"). A esta dimensión se le agregó 65 cm para el extremo de las trozas, para generar un espacio que permitiera su manipulación para colocarlas dentro de las pilas. De esta forma se determinó que el ancho interior de las pilas de calentamiento debería ser de 3.25 m.

Longitud y profundidad de las pilas de calentamiento. La longitud y profundidad de las pilas de calentamiento se definió en función del volumen real que ocuparían las trozas, resultando una longitud exterior de 22 metros y una profundidad de 5.20 metros.

6.1.2. Diseño Constructivo.

Con base en los resultados obtenidos del análisis para determinar la capacidad de las pilas de calentamiento, se definieron las dimensiones exteriores de la obra civil correspondientes a 22 m de largo, 3.85 m de ancho y 5.20 m de altura, como se indican en las Figuras 1 y 2.

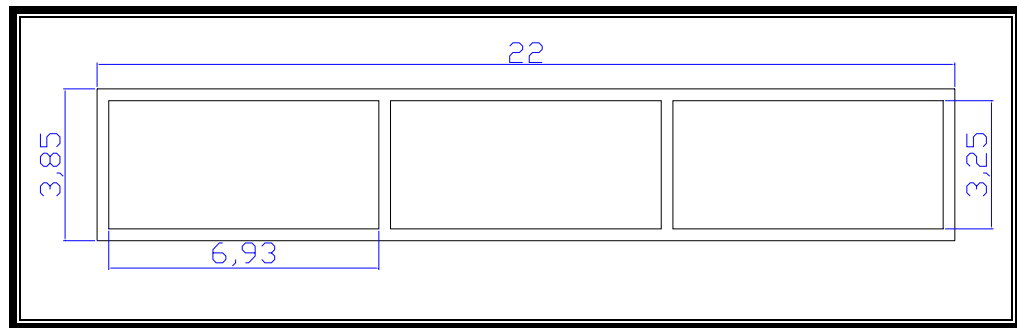


Figura 1. Dimensiones exteriores e interiores de las pilas de calentamiento.

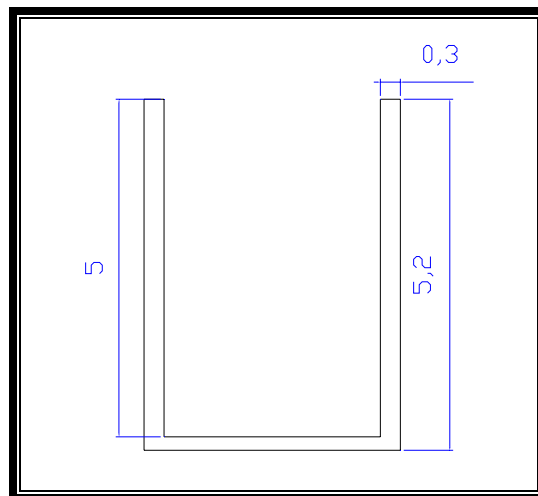


Figura 2. Corte transversal mostrando las dimensiones generales en altura y espesor de muros.

La construcción de las pilas de calentamiento se inició con el levantamiento de tres zapatas corridas, que sobresalen 20 cm del nivel del piso, y que se utilizaran para soportar el peso de las trozas y resguardar a los serpentines que se colocaron en el fondo de las pilas. (Figura 3 y 4).

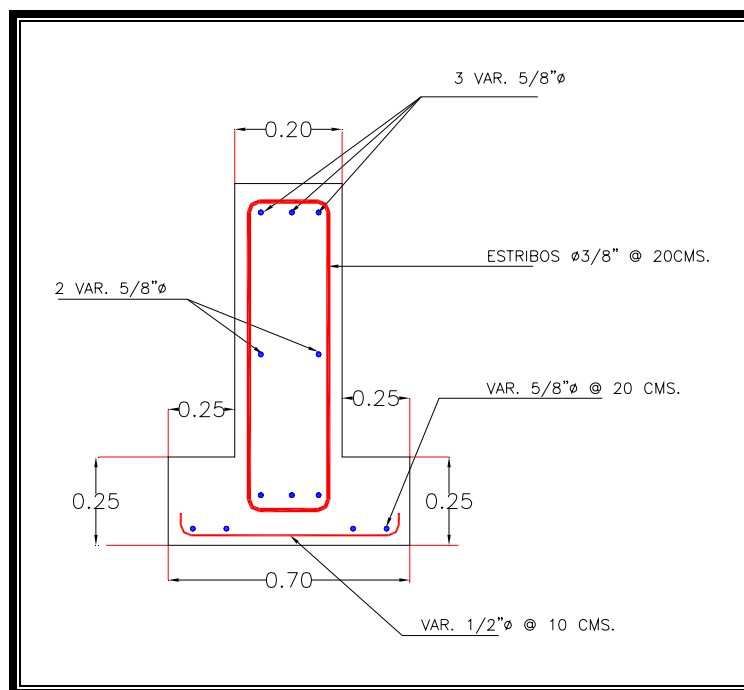


Figura 3. Detalle de la cimentación



Figura 4. Desplante de la cimentación.

El firme o piso de las pilas de calentamiento se formó con una parilla varilla de 3/8" a cada 30 cm (Figura 5), con un grosor de 0.20 m y una pendiente del 2% con la finalidad de facilitar el drenado del agua y la limpieza de las pilas.

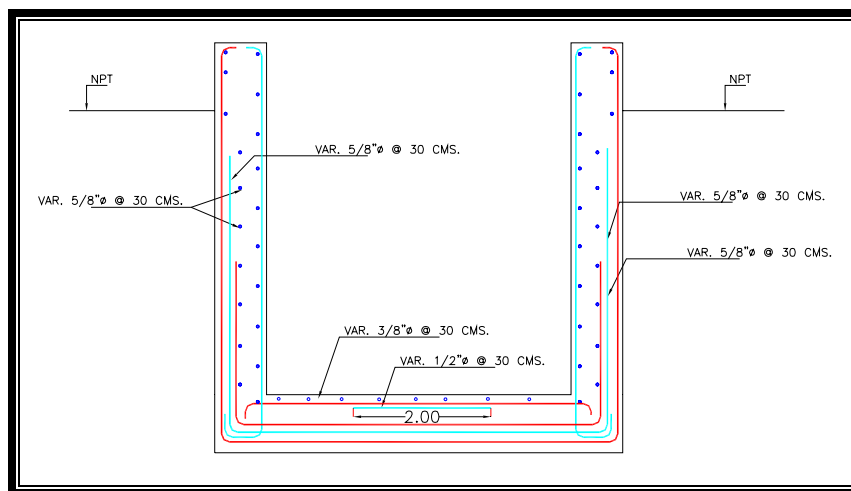


Figura 5. Detalles de refuerzos en muros y pisos.

Los muros se construyeron con un espesor de 0.30 m, reforzados con una doble malla de varilla y a una altura de 5 m, sobresaliendo aproximadamente 1 metro por encima del nivel del suelo, con la finalidad de evitar accidentes de trabajo, como se aprecia en las Figuras 6,7,8,9 y 10.

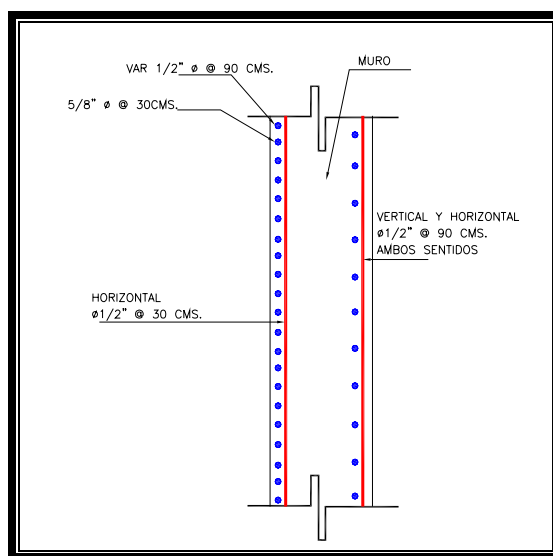


Figura 6. Refuerzos del muro y nivel del suelo.



Figura 7. Pisos terminados y levantamiento de muros



Figura 8. Emparrillado de los muros.



Figura 9. Vista de la obra civil concluida



Figura 10. Pilas de calentamiento con agua para la detección de filtraciones.

6.2. Sistema de transferencia de Calor.

Para la construcción del sistema de serpentines fue necesario definir la cantidad de calor necesario para el proceso de ablandamiento de la trocería; el área mínima de transferencia de calor de los serpentines; el diseño de los intercambiadores y la capacidad de la bomba para el suministro de aceite térmico, de la caldera a las pilas de calentamiento.

6.2.1. Requerimiento de calor para el proceso de ablandamiento.

Para determinar del calor necesario para el proceso de ablandamiento se definió la cantidad de energía necesaria para calentar 150 m³ de madera en rollo, los muros de las pilas de ablandamiento, la energía necesaria para calentar el agua utilizada como medio termoconductor del proceso de ablandamiento de la trocería, la pérdida de energía por transferencia de calor en los muros y las pérdidas de calor por evaporación.

6.2.1.1. Cantidad de energía necesaria para calentar 150 m³ de madera.

Para determinar la energía requerida para el volumen de madera por procesar, se consideró la masa de madera de los 150 m³ en función de su densidad y el agua que regularmente tiene la madera en rollo, que puede variar de un 60 % de contenido de humedad (CH.), para trozas previamente almacenadas en patio, hasta un 140 % de CH para trozas provenientes de árboles recién derribados.

1. Determinación de la masa de la trocería. Se determinó en función del promedio de las densidades de las principales especies que se manejan en la empresa: *Pinus arizonica* (Pino blanco) densidad básica de 430 kg/m³, *Pinus durangensis* (Pino real) 460 kg/m³ y *Pinus leiophylla* (pino chino) 435 kg/m³ y el volumen de madera que se procesa, por medio de las siguientes relaciones (Tabla FITECMA):

$$\rho_p = \frac{\sum \rho_{1,2,3}}{3}$$

Donde: p_p = densidad promedio y $\Sigma p_{1,2,3}$ = sumatoria de las densidades de las de las especies utilizadas en la empresa.

$$m = (\rho)(V)$$

Donde: m = peso de las trozas y la cantidad de agua contenida en la misma (kg); ρ = densidad promedio de las trozas (kg/m^3) y V = volumen de trozas a procesar (m^3).

Con base en la densidad básica de las especies señaladas y con la aplicación de la relación indicada, se determinó una densidad anhidra de 442 kg/m^3 (Cuadro 1).

2. Peso anhidro de las trozas. El peso anhidro de los 150 m^3 de madera en rollo se determinó por la formula general de contenido de humedad para madera (Kollmann, 1959).

$$p_s = \frac{p_h}{C.H. + 1} \times 100$$

Donde: p_s = Peso anhidro de la madera; p_h = Peso húmedo de la madera y C.H. = contenido de humedad de la madera.

3. Masa de agua contenida en la trocería. La cantidad de agua que contienen los 150 m^3 de trocería se definió por diferencias de masas entre la trocería considerando un contenido de humedad del 75% y la masa anhidra de la misma trocería (Cuadro 1).

Cuadro 1 Características y masas de la trocería.

Densidad anhidra promedio de madera de pino (kg/m^3)	442
Volumen de trocería (m^3)	150
Contenido de humedad promedio (%)	75
Masa de la trocería a 75% de C.H. (kg)	66,300
Masa del agua contenida en la trocería (kg)	28,414.285
Masa de la trocería anhidra (kg)	37,885.714

4. Calor necesario para calentar la trocería. La capacidad térmica de la madera húmeda, puede determinarse por evolución de la cantidad de calor requerido para producir un determinado cambio en la temperatura de la pieza de madera en base a su peso seco y la cantidad de calor necesario para producir el mismo cambio de temperatura en el agua contenida en las trozas a través de la siguiente relación (Valiente, 1998):

$$Q_l = m_1 c_1 \Delta T_1 + m_2 c_2 \Delta T_2$$

Donde: Q_l = cantidad de calor requerido para calentar 150 m³r con un 75 % de C.H. (Kcal); m_1 = masa de los 150 m³r en forma anhidra (kg); m_2 = masa del agua contenido en los 150 m³r (kg); c_1 = calor específico promedio de la madera 0.55 Kcal/kg °C; c_2 = calor específico del agua (Kcal/kg °C); ΔT_1 = diferencia de temperatura que se desea en la madera en forma anhidra (17.7 a 45 °C); ΔT_2 = diferencia de temperatura que se desea en el agua contenida en las trozas y C.H. = contenido de humedad promedio de las trozas (%).

Utilizando la información generada en el Cuadro 1 y con la aplicación la fórmula señalada, se determinó la cantidad de calor requerida para los 150 m³r, como se indica en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Cantidad total de energía requerida para el calentamiento de la trocería.

Elemento	Masa (kg)	Calor esp.(Kcal/kg°C)	ΔT (°C)	Q_l (Kcal)
Trozas	37,885.71	0.55 (Anexo 1)	27.3	568,854
Agua	28,414.285	1	27.3	775,710
Q_l				1,344,564

6.2.1.2. Cantidad de energía requerida para calentar los muros de las pilas de ablandamiento.

Para determinar la energía requerida para calentar las pilas, fue necesario definir las áreas de los muros y pisos, y la masa de los elementos de la construcción, para posteriormente, por medio de la relación correspondiente, determinar la cantidad de calor requerido.

1. Área de los muros y pisos. Para cuantificar el área de los muros y pisos se utilizó la siguiente relación (García, 2004):

$$A = a * l$$

Donde A = área; a = ancho y l = longitud.

La información generada para cada concepto analizado se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Área total de los elementos de construcción.

Elemento	Cantidad	Ancho (m)	Longitud (m)	Área total (m ²)
Paredes laterales	2	5.20	22	228.8
Pared, frontal posterior y división	4	3.25	5.20	67.6
Pisos	1	3.25	22	71.5

2. Masa de los elementos de construcción. La masa de los muros y pisos de las pilas se calculó basándose en los planos de construcción, determinándose de la siguiente fórmula (García 2004):

$$V_t = [(2)(l_1)(a_1)(h_1)] + [(4)(l_2)(a_2)(h_2)] + [(l_p)(a_p)(h_p)]$$

Donde: V_t = volumen total de muros y pisos de las pilas de calentamiento (m³); 2 = cantidad de muros grandes de las pilas; l_1 = longitud de los muros grandes de las pilas (m); a_1 = ancho de los

muros grandes de las pilas (m); h_1 = altura de los muros mas grandes (m); l_2 = longitud de los muros divisorios (m); a_2 = ancho muros de división (m); h_2 = altura de los muros de división (m); l_p = longitud del piso (m); a_p = ancho del piso (m) y h_p = espesor del piso (m).

A partir del resultado obtenido por medio de la relación señalada, se determinó la masa de los muros y pisos que conforman las pilas de calentamiento, como se indica en el Cuadro 4, a través de la siguiente fórmula:

$$m_m = (\rho_m)(V_m)$$

Donde: m_m = peso total de los muros y pisos de las pilas (kg); ρ_m = densidad promedio de los muros (cemento, arena y piedras) 2,295.578 kg/m³ (144 lb/ft³ Anexo 2). (Robert, Don y James, 1992.) y V_m = volumen de los muros y pisos (m³).

Cuadro 4. Masa de los elementos de construcción (paredes y pisos).

Elemento	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Masa (kg)
Paredes laterales	2,295.578	228.8	0.30	68.64	157,568.473
Pared, frontal posterior y división	2,295.578	67.6	0.30	20.28	46,554.321
Pisos	2,295.578	71.5	0.20	14.3	32,826.765
Total				103.22	236,949.561

3. Cantidad de energía requerida para el calentamiento de los muros. Para la determinación de la cantidad de energía requerida para calentar los muros de las pilas, se consideró un incremento de temperatura promedio de 72.3 °C, tomando en cuenta que en la parte interior se tendrá una temperatura de 90 °C (temperatura del agua) y en la parte exterior de 17.7 °C, correspondiente a la temperatura media anual del Municipio de Santiago Papasquiaro Durango (Enciclopedia de los Municipios de México) (Cuadro 5). La cantidad de calor requerida se calculó por medio de la siguiente relación (Valiente, 1998):

$$Q_m = m_m C_{p_c} (\Delta T)$$

Donde: Q_m = calor total necesario para calentar los muros (Kcal); m_m = masa de los muros (kg); C_{p_c} = capacidad calorífica del concreto de (0.156 Kcal/kg°C Hormigon concreto) (Perry, Green y Maloney, 1992) y ΔT = diferencia de temperatura promedio en los muros y piso (°C).

Cuadro 5. Cantidad total de energía requerida para el calentamiento de las pilas de ablandamiento.

Elemento	Masa (kg)	Calor esp.(Kcal/kg°C)	ΔT (°C)	Q_m (Kcal)
Paredes laterales	157,568.4739	0.156 (Anexo 1)	72.3	1,777,183.303
Paredes (laterales cortas) y divisiones	46,554.32184	0.156 (Anexo 1)	72.3	525,076.885
Pisos	32,826.7654	0.156 (Anexo 1)	72.3	370,246.521
Q_m				2,672,506.710

6.2.1.3. Cantidad de energía necesaria para calentar el agua del proceso de ablandamiento de trocería.

1. Volumen de agua. Para determinar la cantidad de energía necesaria para el calentamiento del agua que se utilizará durante el proceso de ablandamiento de la trocería, se definió el espacio que sería ocupado por el agua, a través de la siguiente relación (García, 2004):

$$V = (3)(l)(a)(h)$$

Donde: V = volumen de las 3 pilas que será ocupado por agua y los 150 m³; 3 = número de pilas de trozas (m³); l = longitud del espacio que será ocupado por agua y los 150 m³ de trozas (6.93 m); a = ancho del espacio que será ocupado por agua y los 150 m³ de trozas (3.25 m) y h = altura del espacio que será ocupado por agua y los 150 m³ de trozas (5 m).

2. Determinación de la masa de agua. Teniendo en cuenta que son 150 m³ de trozas los que se van a procesar, si se resta este volumen al resultado obtenido de la relación anterior (337 m³), se tiene un volumen de agua de 187 m³, a partir de este volumen y aplicando la relación que se indica a continuación, se determinó la masa de agua que se requiere para el calentamiento de la trocería (Cuadro 6).

$$m = (\rho)(V)$$

Donde: m = peso de las trozas y la cantidad de agua contenida en la misma (kg); ρ = densidad promedio de las trozas (kg/m³) y V = volumen de trozas a procesar (m³).

3. Cantidad de energía necesaria para calentar el agua del proceso. La energía que se requiere para calentar la masa de agua que se utilizará para el ablandamiento de las trozas, se cuantificó por medio de la siguiente fórmula (Valiente, 1998):

$$Q_a = mCp(\Delta T)$$

Donde: Q_a = cantidad de calor necesaria para calentar el agua del proceso; m = masa del agua; Cp = calor específico del agua y ΔT = gradiente de temperatura del agua.

La energía requerida para calentar el agua que se utiliza para el proceso de ablandamiento de las trozas, se indica en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Cantidad de energía requerida para calentar el agua del proceso.

Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Masa de agua (kg)	187000
Calor específico del agua (Kcal/kg°C)	1
Gradiente de temperatura (°C)	72.3
Q_a (Kcal)	13,520,100

6.2.1.4. Transferencia de calor en los muros.

La cantidad de calor que se pierde a través de la transferencia de calor de los muros y el piso, se determinó a través de la fórmula general de transferencia de calor, (Kern, 1974):

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{L}{K}} (A)$$

Donde: t_1 = temperatura al interior de las pilas de calentamiento, 90 °C (194 °F); t_2 = temperatura al exterior de las pilas, 17.7 °C (63.86 °F); L = espesor del muro (ft); A = área de transferencia (ft^2) y K = conductividad térmica del concreto (Btu)(h)(ft^2)(°F/ft).

Con los datos indicados y la aplicación de la fórmula correspondiente, se determinó la pérdida de calor de muros y pisos, como se indica en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Pérdida de calor a través de los muros y pisos.

Muros	
Conductividad térmica del concreto (Btu)(h)(pies ²)(°F/pie)	0.20
Espesor del muro (pies)	1
Área de transferencia en el muro (pies ²)	3,287.298
Temperatura interior del muro y pisos (°F)	194
Temperatura del exterior de muros y pisos (°F)	63.86
Tiempo del proceso (hr)	36
<i>Muros Qs (Btu/hr)</i>	85,561.792
<i>Muros Qs (Kcal)</i>	776,709.416
Pisos y cimientos	
Espesor del piso (pies)	0.656167
Conductividad térmica del concreto (Btu)(h)(pies ²)(°F/pie)	0.20
Área de transferencia en los pisos (pies ²)	727.2905
Temperatura interior del muro y pisos (°F)	194
Temperatura del exterior de muros y pisos (°F)	63.86
<i>Pisos y cimientos Qss (Btu/hr)</i>	28,849.236
<i>Pisos y cimientos Qss (Kcal)</i>	261,886.447

6.2.1.5. Pérdidas de calor por evaporación.

Aún cuando se contempla la posibilidad de cubrir las pilas con tapas de lamina y concreto para evitar la pérdida de calor por evaporación, se consideró necesario cuantificar este concepto previendo que las tapas no se fabriquen de inmediato (Cuadro 8).

La pérdida de calor se determinó a partir de la expresión sugerida por Czarnecki (citada por Manrique, 1982), para determinar las pérdidas totales de calor de una piscina, a través de la siguiente fórmula (Manrique, 1982):

$$Q_L = A_p \left[+ R + 5.68(T_w - T_a) + h_{ca}(T_w - T_a) + 1612h_{ca}(p_w - p_a) \right]$$

Donde: Q_L = pérdidas de calor en W; A_p = área de la pila (m^2); h_{ca} = coeficiente de transferencia de calor por convección. Vasconcelos, Martins et. al., sugieren la expresión: ($h_{ca} = 4.4$, para $V < \text{de } 5 \text{ km/h}$ y $1.39V^{0.8}$, para $V > \text{de } 5 \text{ km/h}$), (citada por Manrique, 1982); P_a = presión de vapor del agua en el aire ambiente, en bars; P_w = presión de saturación del agua a la temperatura de la pila, en bars; R = pérdidas de calor por radiación de un cuerpo negro a la temperatura T_a = valor igual a 79 W/m^2 , de acuerdo con Bliss, (citada por Manrique, 1982); T_a = temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$ y T_w = temperatura del agua, en $^{\circ}\text{C}$.

Analizando el Anexo 3, se observa que la línea de saturación puede aproximarse a una línea recta en el intervalo de temperaturas de interés. Con esta simplificación, la presión de vapor p_a se incrementa aproximadamente 1.99×10^{-3} bar por cada grado Celsius. En consecuencia la ecuación anterior en forma simplificada, se expresa por la siguiente relación (Manrique, 1982):

$$Q_L = A_p [5.68 + h_{ca} + 3.20h_{ca}] \Delta T_w$$

Donde: A_p = área de las pilas de calentamiento (m^2); h_{ca} = coeficiente de transferencia de calor por convección. Vasconcelos, Martins et. al., sugieren la expresión: ($h_{ca} = 4.4$, para $V < \text{de } 5 \text{ Km/h}$ y $1.39V^{0.8}$, para $V > \text{de } 5 \text{ Km/h}$), (citada por Manrique, 1982) y ΔT_w = incremento de temperatura del agua, en $^{\circ}\text{C}$.

Cuadro 8. Pérdida de calor por evaporación.

Área de la pila (m^2)	67.6
Coeficiente de transferencia de calor por convección para $V < \text{de } 5 \text{ Km/h}$	4.4
Pérdidas de calor por radiación de un cuerpo negro (W/m^2)	79.0
Temperatura ambiente aproximada ($^{\circ}\text{C}$)	17.7
Temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)	90.0
Pérdidas de calor en W Q_L	118,081.516
Pérdidas de calor en Kcal /proceso Q_L	3,657,661.852

Nota: $1\text{cal/hr} = 1.1622 \times 10^{-3} \text{ W}$

6.2.1.6. Cantidad de calor necesario para el proceso de ablandamiento de la trocería.

La demanda de calor para el proceso de ablandamiento de los 150 m³ de trocería, se obtuvo a través de la suma de las cantidades de calor anteriormente calculados por cada uno de los parámetros señalados. Como se indica en el Cuadro 9 y en la Figura 11; a través de la siguiente relación:

$$Q_T = Q_l + Q_m + Q_a + Q_s + Q_{ss} + Q_L$$

Donde: Q_T = cantidad de calor necesario para el proceso de ablandamiento de la trocería ((Kcal/proceso); Q_l = cantidad de energía necesaria para calentar 150 m³ rollo de madera (Kcal/proceso); Q_m = cantidad de energía requerida para calentar los muros de las pilas de ablandamiento (Kcal/proceso); Q_a = cantidad de energía necesaria para calentar el agua que se utilizó durante el proceso (Kcal/proceso); Q_s = cantidad de calor que se pierde a través de la transferencia de calor de los muros (Kcal/proceso); Q_{ss} = cantidad de calor que se pierde a través de la transferencia de calor de los pisos (Kcal/proceso) y Q_L = pérdidas de calor por evaporación (Kcal/proceso).

Cuadro 9. Calor total requerido para el proceso de ablandamiento de los 150 m³r.

Calentamiento de la trocería (Kcal/proceso)	1,344,564.000
Calentamiento de las pilas (Kcal/proceso)	1,672,506.710
Calentamiento del agua (Kcal/proceso)	13,520,100.000
Pérdida de calor en los muros (Kcal/proceso)	776,709.416
Pérdida de calor en los pisos (Kcal/proceso)	261,886.447
Pérdidas de calor por evaporación (Kcal /proceso)	3,657,661.852
Q_T (Kcal/proceso)	21,233,428.430
Q_T (Kcal/hr)	589,817.456

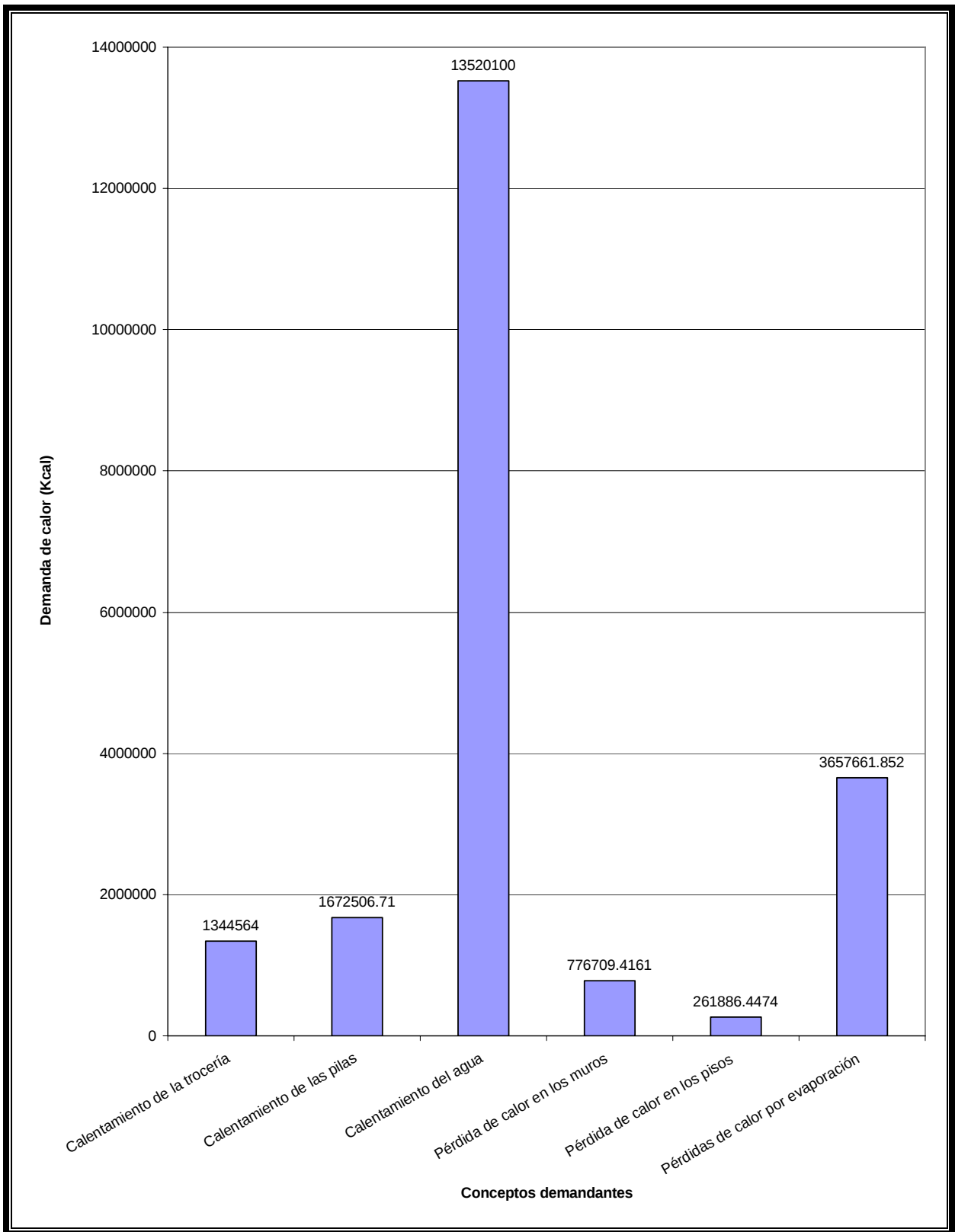


Figura. 11. Demanda de calor para el proceso de ablandamiento de 150 m³r.

6.2.2. Diseño de los serpentines de para la transferencia de calor.

En función de la demanda de calor necesario para el proceso de ablandamiento de la trocería, se determinó el área mínima de transferencia de los serpentines basada en la ecuación de flujo (Incropera, 1999):

$$A = \frac{Q}{U(t_2 - t_1)}$$

Donde: A = área de transferencia de calor (m^2); Q = energía calorífica necesaria para el calentamiento de las trozas (Kcal); U = coeficiente global de transferencia; t_1 = temperatura del fluido a calentar ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$); t_2 = temperatura interior del serpentín ($160\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Para el cálculo del área de transferencia de calor, primeramente se determinó el coeficiente global de transferencia de calor a partir de la siguiente ecuación (Incropera, 1999):

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_o)}$$

El coeficiente de convección (h_i) al interior del tubo se determinó en función del número de Nussent (Cuadro 10) a partir de la ecuación de Dittus- Boulter (Incoprera, 1999):

$$Nu = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^n$$

Donde: Nu = número de Nusset; $n = 0.4$; para calentamiento; Re_D = número de Reynolds y Pr = número de Prandtl.

Cuadro 10. Número de Nusset

Número de Reynolds en un tubo del serpentín	14,733
Número de Prandtl.	84
Número de Nusset Nu	292.46

Una vez calculado el número de Nusselt se utilizó para determinar el coeficiente de convección al interior del tubo por medio de la siguiente relación (Incropera, 1999).

$$h_i = \frac{k}{D} Nu$$

Donde: $k = 0.133 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ a una temperatura del aceite térmico de 145°C y $D =$ diámetro de la tubería (0.06033 m), resulto $hi = 644.74$.

El coeficiente de convección (h_o) al exterior del tubo se determinó a partir de la siguiente relación (Incropera, 1999).

$$ho = .062 \left[\frac{k_v^3 p_v (p_l - p_v) (h_{fg} + .8 c_{p,v} \Delta T_e)}{\mu_v D \Delta T_e} \right]^{1/4}$$

Donde: del anexo 4, propiedades termofísicas de agua saturada líquida, (90°C); $p_l = 1/v_f = 963.39 \text{ kg/m}^3$; $h_g = 2278 \times 10^{-3} \text{ Kj/kg}$. Del anexo 4 para vapor de agua saturada, (50°C); $p_v = 1/v_g = 0.0904 \text{ kg/m}^3$; $c_{p,v} = c_{p,g} = 1.903 \times 10^{-3} \text{ Kj/kg }^\circ\text{K}$; $k_v = k_g = 0.0213 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ y $\mu_v = \mu_g = 10.09 \times 10^{-6}$.

Aplicando la ecuación correspondiente, se obtuvo un coeficiente de convección al exterior del tubo de $450 \text{ W/m}^2\text{K}$. Por lo tanto, a través de la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor, se determinó que U es igual a $265 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ($228 \text{ Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$).

Con la integración de la información de la demanda de calor requerida para los $150 \text{ m}^3\text{r}$, la pérdida de calor del sistema, las temperaturas inicial y final del proceso, y la temperatura del intercambiador, se determinó el área mínima de transferencia de calor que debe tener el intercambiador (Cuadro 11).

Cuadro 11. Área mínima de transferencia de calor del los serpentines.

Demanda total de calor (Kcal/hr)	589,817.456
Coeficiente global de transferencia de calor (Kcal/m ² h°C)	228
Temperatura posible del proceso (°C)	90
Temperatura de los serpentines (°C)	160
Área mínima de transferencia de calor (m ²)	37

Tomando en cuenta que el tubo que se utilizará es de 60.33 mm (2.375 pulg) de diámetro externo, cedula 40, se calculó su longitud total a través de la siguiente relación (García, 2004):

$$P = 3.1416 (d)$$

Donde: P = perímetro del serpentín y d = diámetro del tubo

$$P = 3.1416 (0.05842 \text{ m}) = 0.1835 \text{ m}$$

Para determinar la longitud del serpentín, con la información señalada, se utilizó la siguiente fórmula (García, 2004):

$$l = A/P$$

Donde: l = longitud total de tubo requerido (m); A = área mínima requerida para el intercambio de calor (m²) y P = perímetro del serpentín (m).

Al aplicar los cálculos correspondientes, se determinó una longitud mínima requerida del serpentín de 201 m, es decir, para cada pila se requieren 67 m de tubo como mínimo.

El serpentín para las pilas de ablandamiento se construyó con tubo de fierro negro sin costura. De acuerdo a los requerimientos de calor para el sistema, se determinó un serpentín con 18 tubos de 60.33 mm (2.375 pulg) de diámetro externo (Anexo 11), en dos secciones con tres juegos de tres tubos por cada uno, a través de un cabezal (Figura 12).

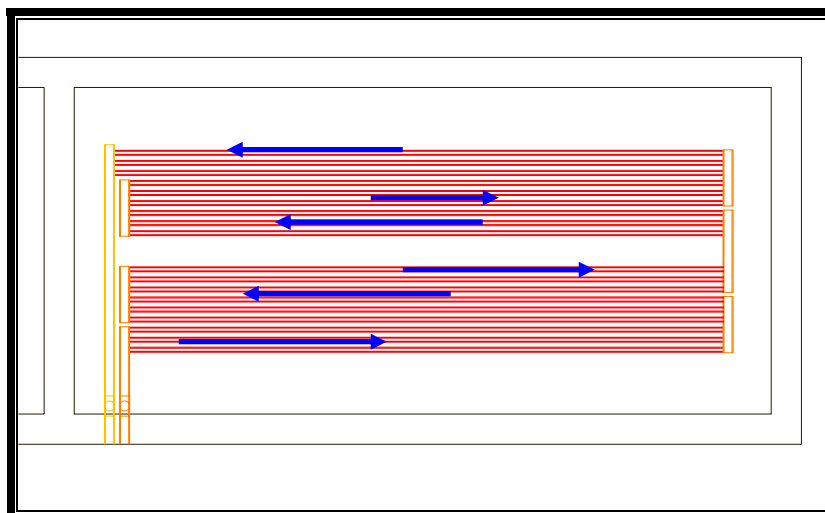


Figura 12. Diseño de los serpentines de calor y flujo del aceite térmico.

6.2.3. Potencia de la bomba para el suministro de aceite térmico.

1. **Gasto másico.** Para poder determinar la potencia de la bomba fue necesario conocer el gasto volumétrico del aceite térmico, para lo cual se determinó el gasto másico (Cuadro 12), a partir de la siguiente ecuación (Valiente, 1998).

$$L_2 = \frac{Q_g}{Cp(T_4 - T_3)}$$

Donde: L_2 = gasto másico (kg/h); Cp = calor específico del aceite (Kcal/ kg°C); ΔT = diferencia de temperatura (°C) y Q_g = calor ganado por el agua del proceso.

Cuadro 12. Gasto másico de aceite térmico.

Calor específico (Aceite de motor sin usar) (Kcal/ kg°C) Anexo 9	0.60
Calor ganado por el agua del proceso Kcal/hr	589,817.456
Temperatura de entrada del aceite (°C)	160
Temperatura de salida del aceite (°C)	130
Flujo másico (kg/hr)	32,767.636

En función del resultado obtenido se determinó que en el proceso se bombeara un flujo másico de aceite térmico de 32,767.6 kg/hr, valor que representa las dos terceras partes del gasto que se utilizará para los 150 m³ de trocería, se definió hacer el cálculo con este concepto tomando en cuenta que siempre debe de permanecer un pila vacía.

2. Determinación del flujo volumétrico. El flujo volumétrico requerido para el proceso de ablandamiento de la trocería se especifica en el Cuadro 13 y se calculó a través de la siguiente relación:

$$G_v = \frac{G_m}{\rho}$$

Donde: G_v = gasto volumétrico de aceite térmico (m³/min); G_m = Gasto másico (kg/hr) y ρ = densidad del aceite (kg/m³).

Cuadro 13. Gasto volumétrico.

Densidad del aceite a 160 °C (kg/m ³)	806.5
Gasto másico (kg/hr)	32,767.6
Gasto volumétrico (m ³ /min)	0.677
Gasto volumétrico (m ³ /seg)	0.0112

3. Determinación de la velocidad lineal del aceite térmico. La capacidad de la bomba, esta en función del gasto volumétrico y de la velocidad lineal del fluido (Cuadro 14), este último parámetro se calculó a través de la siguiente relación (Viejo 1975):

$$v = \frac{G}{A}$$

Donde: v = velocidad lineal del fluido (m/s); G = gasto volumétrico (m³/s) y A = área de la sección transversal de la tubería (m²).

Cuadro 14. Velocidad lineal del aceite térmico en el sistema.

Tubería de 4" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.1023
Área de la sección transversal de la tubería (m ²)	0.00821
Gasto volumétrico (m ³ /s)	0.0112
Velocidad lineal del fluido (m/s)	1.3641
Tubería de 2" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Área de la sección transversal de la tubería (m ²)	0.002165
Gasto volumétrico en un tubo antes de entrar al serpentín	0.0056
Velocidad lineal del fluido (m/s)	2.5878

4. Cálculo del Número de Reynolds. Para definir el tipo de flujo del aceite (laminar o turbulento) el cual influye en la facilidad o dificultad de circulación del fluido, fue necesario calcular el Número de Reynolds. Para determinar la densidad del aceite a 160 °C y su viscosidad a esta misma temperatura, se comparó el aceite térmico utilizado en esta fábrica con un aceite SAE 10 con una densidad de 7.7 lb/gal, ya que presenta la misma tendencia de viscosidad hacia los 100 °C. Para una temperatura de 160 °C (320 °F) se obtuvo una viscosidad aproximada de 2 cp (2×10^{-3} kg/m.s) y a 130 se obtuvo una viscosidad de 3 cp (3×10^{-3} kg/m.s). Comparando el aceite utilizado en la fabrica con el aceite de motor sin usar (Anexo 9), por sus densidades parecidas se obtuvo un valor de 806.5 Kg/m³ a 160 °C y 825.1 Kg/m³ a 130 °C y aplicando la fórmula que se indica a continuación, se determinaron dos condiciones de flujo, para tubería de 4" y de 2" (diámetro nominal) como se indica en el Cuadro 15 (Geankoplis, 1998).

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Donde: N_{RE} = Número de Reynolds; D = diámetro del tubo, v = velocidad del fluido dentro de la tubería; μ = viscosidad del fluido (°C) y ρ = densidad del fluido (°C).

Cuadro 15. Número de Reynolds para el sistema de aceite térmico.

Tubería de 4" de diámetro nominal	
Densidad aproximado del aceite a 160 °C (kg/m ³)	806.5
Viscosidad del aceite a 160 °C (kg/m.s) (Anexo 5)	0.002
Velocidad del fluido (m/s)	1.3641
Diámetro de la tubería (m)	0.1023
Número de Reynolds	56272.50
Tubería de 2" de diámetro nominal	
Densidad aproximada del aceite a (kg/m ³)	806.5
Viscosidad del aceite a 130 °C (kg/m.s) (Anexo 5)	0.002
Velocidad del fluido (m/s)	2.5878
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Número de Reynolds	58997.12

Nota: el resultado indica que el flujo es turbulento (cuando el $N_{Re} >$ de 4000 el flujo será turbulento)

Pérdidas de flujo por fricción: (ΣF). Cuando el corte transversal de la tubería se reduce bruscamente, la corriente no puede fluir en forma normal en las esquinas de la contracción y los remolinos causados provocan pérdidas por fricción. Estas pérdidas por fricción se manifiestan a la salida y entrada de la caldera, con los ensanchamientos o reducciones de la tubería recta, en las válvulas, en las tes y en los codos.

Para el cálculo de la capacidad de la bomba se omitieron las pérdidas por fricción a la salida y entrada del aceite a la caldera, por considerar que estos parámetros, para el caso especial de este proyecto, no contribuyen en un aumento en la potencia de la bomba.

5. Cálculo de pérdida de carga en el recorrido del aceite térmico por la tubería. Para determinar la pérdida de carga en el recorrido del aceite térmico por la tubería, se utilizó la siguiente relación (Viejo, 1975):

$$hf = \frac{(f)(L_{eq})(v^2)}{2Dg}$$

Donde: hf = pérdida de carga (m); f = factor de fricción de Fanning; L_{eq} = longitud equivalente (m); D = diámetro de la tubería (m); v = velocidad del flujo de aceite (m/s) y g = coeficiente de gravedad (m/s^2).

Para conocer la pérdida de carga total, se requirió determinar tanto el coeficiente de fricción de la tubería como la longitud equivalente de la tubería correspondiente a carga por accesorios (codos, Tes, y válvulas).

El coeficiente de fricción (f) se determinó a partir del Anexo 6 (factor de fricción en función del número de Reynolds con rugosidad relativa como parámetro), para lo cual se requirió conocer previamente, tanto el número de Reynolds, como la rugosidad relativa de la tubería, este último parámetro se calculó a partir de la siguiente relación (Geankoplis, 1998):

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D}$$

Donde: ε = rugosidad equivalente para tubería nuevas (m) y D = diámetro de la tubería

Con los datos obtenidos para el número de Reynolds y la rugosidad relativa se empleó el Anexo 6 para obtener la rugosidad equivalente para tuberías nuevas. Los resultados se muestran en el Cuadro 17.

6. Cálculo de la longitud equivalente. La longitud equivalente de una tubería está comprendida por la longitud recta de la tubería y la longitud equivalente de los accesorios que participan en el suministro del fluido (aceite térmico).

La longitud equivalente de los accesorios se consideró entre codos de 90°, retornos en U y Tes. Este parámetro se determinó a partir de la tabla del Anexo 10 en función del diámetro de las tuberías, los resultados se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Longitud equivalente para los accesorios.

Accesorio	Número de accesorios	Longitud equivalente aproximada (m)
Codos radio medio (90°) de 4"	3	8.4
Válvula de compuerta abierta de 4"	3	2.1
Tes de 4" de paso directo	2	4.2
Tes de 4" salida lateral	2	13.4
Tubería recta aproximada de 4"	-----	160
Codos de radio medio (90°) de 2"	100	140
Válvula de compuerta abierta de 2"	4	1.6
Tubería recta aproximada de 2"	-----	300

Con base a los parámetros obtenidos (Cuadro 16), se determinó la carga total por fricción para la tubería de 2 y 4 pulgadas, con la relación anteriormente mencionada; los resultados se observan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Pérdida de carga por fricción en tubería recta.

Tubería de 4" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.1023
Rugosidad equivalente para tuberías nuevas (Geankoplis, 1998) anexo 4	1.5×10^{-4}
Velocidad del fluido (m/s)	1.3641
Rugosidad relativa	1.466×10^{-3}
Número de Reynolds	56272.50
Factor de fricción de Fanning (Geankoplis 1998) (f)	0.007
Longitud equivalente en tubería aproximado (m)	188.1
<i>hf (m)</i>	1.22
Tubería de 2" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Rugosidad equivalente para tuberías nuevas (Geankoplis 1998) anexo 4	1.5×10^{-4}
Velocidad del fluido (m/s)	2.5878
Rugosidad relativa	2.857×10^{-3}
Número de Reynolds	58997.12
Factor de fricción de Fanning (Geankoplis 1998) (f)	0.007
Longitud equivalente en tubería de (m)	441.6
<i>hf (m)</i>	20.09

Con los resultados obtenidos en el Cuadro 17, se determinó la pérdida de carga total (*hf*) sumando los resultados correspondientes, se obtuvo la pérdida de energía por carga en la tubería recta, que fue de 21.31 m.

7. Determinación de la carga dinámica (H_B). La altura dinámica o carga de la bomba se determinó en base a la siguiente relación, en la que se excluyeron variables con valor de cero (Viejo, 1975).

$$H_B = hf + \frac{p_2}{\rho} + z_2$$

Donde: H_B = altura dinámica (m); h_f = pérdida de carga (m); p_2 = presión al final de la conducción (kg/m^2); ρ = densidad del aceite a la salida del serpentín (kg/m^3) y z_2 = altura al final de la conducción (m).

Los resultados generados de la formula se muestran en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Altura dinámica.

Altura de entrada de la caldera z_2 (m)	12
Densidad promedio del aceite (kg/m^3)	815.8
Presión a la entrada de la caldera p_2 (kg/m^2)	4×10^4
Pérdida de carga (m)	21.31
H_B (m)	82.34

8. Potencia de la bomba. La potencia de la bomba para el aceite térmico se determinó en función de la carga dinámica suministrada por la bomba, la densidad, la gravedad y el gasto volumétrico requerido, con base en la siguiente ecuación (Viejo, 1975):

$$P = (H_B)(\rho)(g)(Q)$$

Donde: P = potencia de la bomba (W); H_B = altura dinámica (m); ρ = densidad promedio del aceite térmico (kg/m^3); g = coeficiente de gravedad (m/s^2) y Q = gasto volumétrico (m^3/s).

Aplicando la relación señalada, se determinó una bomba con una potencia de 7380.428 W. Considerando la equivalencia de 1HP que es igual a 745.70 W, se definió una bomba de 9.897 HP.

9. Potencia real de la bomba. Para determinar la potencia real de la bomba, se considero una eficiencia de 60%, con base en la siguiente relación (Viejo, 1975):

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{\%}$$

Donde: P_{real} = potencia real de la bomba (HP); $P_{teórica}$ = potencia teórica de la bomba (HP) y % = eficiencia de la bomba.

Al sustituir los parámetros en la relación indicada, se obtuvo una potencia real de la bomba de 16.49 HP. Por lo tanto la potencia teórica sería su inmediato superior (17 HP), comercialmente se tendría que adquirir una bomba con un motor de 20 HP.

6.3. Sistema de flujo para el movimiento del agua entre pilas.

El sistema de flujo del agua, comprende la determinación de la capacidad de la bomba y el diseño del flujo para el intercambio del agua entre pilas de calentamiento.

6.3.1. Capacidad de la bomba.

Para determinar la capacidad de la bomba para el intercambio del agua entre pilas, se requirió definir el flujo volumétrico, la velocidad lineal del agua, el Número de Reynolds en función del tipo de flujo, la pérdida de flujo por reducción y ensanchamiento del diámetro de la tubería y las pérdidas de flujo por accesorios y válvulas.

1. Determinación del flujo volumétrico. Para determinar el flujo volumétrico se tomó en cuenta el volumen de agua a intercambiar entre pilas de calentamiento, el tiempo de intercambio, la temperatura del agua y su densidad a determinada temperatura, generándose los resultados que se muestran en el Cuadro 19, el cual se obtuvo aplicando la siguiente ecuación:

$$Gv = \frac{V}{t}$$

Donde: Gv = gasto volumétrico; V = volumen del agua a intercambiar y t = tiempo estimado para el intercambio del agua.

Cuadro 19. Gasto volumétrico del agua

Densidad del agua a 50 °C (kg/m ³) (Geankoplis, 1998)	998.07
Viscosidad del agua a 50 °C (kg/m.s) (Geankoplis, 1998)	0.5949x10 ⁻³
Volumen del agua a intercambiar (m ³)	60
Tiempo estimado para el intercambio del agua (hrs)	2.5
Gasto volumétrico (m³/s)	0.0066

2. Determinación de la velocidad lineal del flujo del agua. La velocidad lineal del agua se determinó en función del gasto volumétrico y el área de la sección transversal de la tubería que se utilizó en el sistema, generándose los resultados que se muestran en el Cuadro 20, a través de la siguiente fórmula (Viejo, 1975):

$$v = \frac{G}{A}$$

Donde: v = velocidad lineal del fluido (m/s); G = gasto volumétrico (m³/s) y A = área de la sección transversal de la tubería (m²).

Cuadro 20. Velocidad lineal del fluido.

Velocidad lineal en la tubería de 2" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Área de la sección transversal de la tubería (m ²)	0.002165
Gasto volumétrico (m ³ /s)	0.0066
Velocidad lineal del fluido (m/s)	3.048
Velocidad lineal en la tubería de 1.5" de diámetro nominal	
Diámetro de la tubería (m)	0.04089
Área de la sección transversal de la tubería (m ²)	0.001313
Gasto volumétrico (m ³ /s)	0.0066
Velocidad lineal del fluido (m/s)	5.026

3. Cálculo del Número de Reynolds. Con la finalidad de definir el tipo de flujo que presentaría el agua (laminar o turbulento), se determinó el Número de Reynolds aplicando la ecuación que se indica a continuación (Geankoplis, 1998), los resultados obtenidos se señalan en el Cuadro 21.

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Donde: N_{Re} = número de Reynolds; D = diámetro del tubo; v = velocidad del fluido dentro de la tubería; μ = viscosidad del fluido a 50°C y ρ = densidad del fluido a 50°C.

Cuadro 21. Número de Reynolds para el sistema de flujo de agua.

Número de Reynolds para la tubería de 2"	
Densidad del agua a 50 °C (kg/m ³) (Geankoplis, 1998)	998.07
Viscosidad del agua a 50°C (kg/m.s) (Geankoplis, 1998)	0.5949x10 ⁻³
Velocidad del fluido (m/s)	3.048
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Número de Reynolds	268,467.24
Número de Reynolds para la tubería de 1.5"	
Velocidad del fluido (m/s)	5.026
Diámetro de la tubería (m)	0.04089
Número de Reynolds	344,791.56

Nota: El resultado indica que el flujo es turbulento

Cálculos de pérdidas de fluidez por fricción: (ΣF).

Las pérdidas de fluidez del agua se presentan por reducción o ensanchamiento del diámetro en la línea, por fricción en la entrada y salida de la tubería, por fricción del agua en la tubería y por fricción en las válvulas y accesorios.

4. Pérdida de fluidez por reducción a la entrada de la tubería. La pérdida de fluidez por reducción del área a la entrada de la tubería se calculó en función de la velocidad del fluido y del área presente en el sistema, que para el caso de flujo turbulento esta pérdida se determinó por la siguiente relación (Geankoplis, 1998):

$$h_c = 0.55 \left[1 - \frac{A_2}{A_1} \right] \frac{v_2^2}{2\alpha} = K_c \frac{v_2^2}{2\alpha}$$

Donde: h_c = pérdida de fluidez por fricción; $\alpha = 1.0$ para flujo turbulento; v_2 = velocidad promedio en la sección mas pequeña o corriente abajo y K_c = coeficiente de pérdida de fluidez por reducción del área a la entrada de la tubería (P1), aproximadamente igual a $0.55 (1 - A_2/A_1)$.

Las pérdidas de fluidez por reducción del área a la entrada de la tubería y por reducción en la tubería de 2", se indican en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Pérdida de fluidez por reducción a la entrada de la tubería y por reducción de la tubería de 2 pulgadas.

Pérdida de fluidez por reducción a la entrada de la tubería	
Factor de corrección para flujo turbulento (α) (Geankoplis, 1998)	1.0
Velocidad promedio en la sección mas pequeña (2") (m/s)	3.048
Coeficiente de pérdida por contracción (K_c)	0.55
Pérdida por reducción (J/kg)	2.55
Pérdida de fluidez por reducción en las tuberías de 2"	
Factor de corrección para flujo turbulento (α) (Geankoplis, 1998)	1.0
Velocidad promedio en la sección mas pequeña (1.5") (m/s)	5.026
Área de la tubería de 2" (m ²)	0.002165
Área de la tubería de 1.5" (m ²)	0.001313
Coeficiente de pérdida por contracción (K_c)	0.40
Número de reducciones presentes en el sistema	1
Pérdida por reducción (J/kg)	5.052

5. Pérdida de fluidez por aumento del diámetro de la tubería. Este concepto se calculó a partir de la ecuación que se indica a continuación (Geankoplis, 1998), los resultados generados se especifican en el Cuadro 23.

$$hex = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2a}$$

Donde: hex = pérdida de fluidez por aumento del diámetro de la tubería (J/kg); v_1 = velocidad en el área mas pequeña de la tubería (m/s); A_1 = área de la sección mas pequeña de la tubería (m²) y A_2 = área de la sección mas grande de la tubería (m²).

Cuadro 23. Pérdida de fluidez por aumento del diámetro en la tubería de 1.5"

Factor de corrección para flujo turbulento (α) (Geankoplis, 1998)	1.0
Velocidad promedio en la sección mas pequeña (1.5")	5.026
Área de la tubería de 2" (m ²)	0.002165
Área de la tubería de 1.5" (m ²)	0.001313
Número de ensanchamientos presentes en la tubería	1
Pérdida de fluidez por ensanchamiento (J/kg)	1.956

6. Pérdidas por ensanchamiento a la salida de la tubería. La pérdida de fluidez a la salida de la tubería se determinó considerando la relación de áreas igual a cero, debido a que el área de la tubería es muy reducida comparada con el área la pila de calentamiento. Los resultados obtenidos de este concepto se indican en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Pérdida de fluidez por ensanchamiento a la salida de la tubería.

Factor de corrección para flujo turbulento (α) (Geankoplis, 1998)	1.0
Velocidad promedio en la sección mas pequeña 2" (m/s)	3.048
Pérdida de fluidez por ensanchamiento a la salida de la tubería (J/kg)	2.55

7. Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta. Para determinar la pérdida de fluidez en la tubería recta, se definió el factor de fricción de Fanning en función de la rugosidad relativa, calculado a partir de la relación correspondiente y el Número de Reynolds (Cuadro 25).

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D}$$

Donde: ε = rugosidad equivalente para tuberías nuevas (m) y D = diámetro de la tubería (m).

Sustituyendo los valores obtenidos, en la ecuación que se describe a continuación, se determinó la pérdida de fluidez en la tubería recta (Geankoplis, 1998). Los resultados generados se indican en el Cuadro 25.

$$F_f = 4f \frac{\Delta L}{D} \frac{v^2}{2}$$

Donde: F_f = Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta (J/kg); D = diámetro de la tubería (m); f = factor de fricción de Fanning; v = velocidad del fluido (m/s) y ΔL = incremento de longitud (m).

Cuadro 25. Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta.

Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta de 2”	
Diámetro de la tubería (m)	0.05250
Rugosidad equivalente para tuberías nuevas (Geankoplis, 1998)	4.6×10^{-5}
Velocidad del fluido (m/s)	3.048
Rugosidad relativa	8.76×10^{-5}
Número de Reynolds	268467.24
Factor de fricción de Fanning (Geankoplis, 1998) (f)	0.005
Incremento de longitud (m)	15
Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta (J/kg)	2.6
Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta de 1.5”	
Diámetro de la tubería (m)	0.04089
Rugosidad equivalente para tuberías nuevas (Geankoplis, 1998)	4.6×10^{-5}
Velocidad del fluido (m/s)	5.026
Rugosidad relativa	1.12×10^{-3}
Número de Reynolds	344791.56
Factor de fricción de Fanning (Geankoplis, 1998) (f)	0.007
Incremento de longitud (m)	5.5
Pérdida de fluidez por fricción en la tubería recta (J/kg)	54.36

8. Pérdida de fluidez por efecto de la fricción en accesorios y válvulas: La pérdida de fluidez por efecto de la fricción en accesorios y válvulas se calculó a partir de la ecuación siguiente (Geankoplis, 1998):

$$h_f = K_f \frac{v_1^2}{2}$$

Donde: h_f = pérdida de fluidez por accesorios y válvulas y K_f = factor de fricción por accesorios y v_1 = velocidad promedio del fluido.

La pérdida de fluidez por fricción en accesorios y válvulas utilizados en el sistema se indica en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Pérdidas de energía por fricción en válvulas y accesorios.

Pérdida de energía por fricción en los codos de 2"	
Número de codos (90°)	4
Velocidad de flujo (m/s)	3.048
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	0.75
Pérdida de energía por codos (J/kg)	13.9
Pérdida de energía por fricción en codos de 1.5"	
Número de codos (90°)	3
Velocidad de flujo (m/s)	5.026
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	0.75
Pérdida de energía por fricción en codos (J/kg)	28.41
Pérdida de energía por fricción en las válvulas de 2"	
Número de válvulas	3
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	4.5
Pérdida de energía por válvulas (J/kg)	62.70
Pérdida de energía por fricción en las válvulas de 1.5"	
Número de válvulas	1
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	4.5
Pérdida de energía por Válvulas (J/kg)	56.83
Pérdida de energía por fricción en las Tes de 2"	
Número de Tes	2
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	1
Pérdida de energía por fricción en las Tes de 2" (J/kg)	9.29
Pérdida energía por fricción en las Tes de 1.5"	
Número de Tes	1
Factor de fricción por accesorios (Geankoplis, 1998)	1
Pérdida de energía por fricción en las Tes de 1.5" (J/kg)	12.63

9. Pérdida de energía total por fricción (ΣF). Para determinar la pérdida total de energía o de flujo por fricción en todo el sistema de la tubería para el intercambio del agua entre pilas, se integraron los diferentes conceptos antes calculados. El resultado se muestra en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Pérdida total de energía por fricción en el sistema.

Pérdida de energía por reducción a la entrada de la tubería (J/kg)	2.55
Pérdida de energía por reducción en la tubería de 2" a 1.5" (J/kg)	5.052
Pérdida de energía por aumento en la tubería de 1.5" a 2" (J/kg)	1.956
Pérdida de energía por ensanchamiento a la salida de la tubería (J/kg)	2.55
Pérdida de energía por fricción de la tubería recta de 2" (J/kg)	2.2
Pérdida de energía por fricción de la tubería recta de 1.5" (J/kg)	54.36
Pérdida de energía por fricción en los codos de 2" (J/kg)	13.9
Pérdida de energía por fricción en los codos de 1.5" (J/kg)	28.41
Pérdida de energía por válvulas de 2" (J/Kg)	62.70
Pérdida de energía por válvulas 1.5" (J/kg)	56.83
Pérdida de energía por fricción en las Tes de 2" (J/kg)	9.29
Pérdida de energía por fricción en las Tes de 1.5" (J/kg)	12.63
Pérdida total energía por fricción (J/kg)	257.7086

10. Balance de energía en el sistema de Bombeo. Se calculó de acuerdo a la ecuación de balance de energía mecánica, eliminando las variables con valor de cero (Geankoplis, 1998):

$$g(z_2 - z_1) + \Sigma F + W_s = 0$$

Donde: g = constante de gravedad (m/s^2); z_1 = altura inicial de la conducción (m); z_2 = altura al final de la conducción (m); ΣF = pérdida total de energía por fricción (J/kg) y W_s = energía mecánica que la bomba suministra al fluido (J/kg).

El resumen de los cálculos realizados para determinar el balance de energía, se indican en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Balance de energía en el sistema de bombeo para el intercambio del agua entre pilas.

Gravedad g (m/s^2)	9.806
Altura máxima de conducción z_2 (m)	0.70
Altura inicial de la conducción z_1 (m)	- 4
Pérdida total de energía por fricción ΣF (J/kg)	257.7086
Energía mecánica que la bomba suministra al fluido W_s (J/kg)	-303.7968

13. Potencia de la Bomba. La potencia de la bomba se determinó en función de la carga axial suministrada por la bomba, el gasto másico requerido y la eficiencia de la bomba (Cuadro 29), en base a la siguiente relación (Geankoplis, 1998):

$$W_p = \frac{W_s m}{n}$$

Donde: W_p = potencia real de la bomba (W); W_s = energía suministrada por la bomba (J/kg); n = eficiencia de la bomba (%) y m = flujo másico (kg/s).

Cuadro 29. Potencia de la bomba.

Energía mecánica que la bomba suministra al fluido W_s (J/kg.)	-303.7968
Eficiencia de la bomba n (%)	80
Gasto másico requerido (Kg/s)	6.587
Potencia real de la bomba W_p (W)	2501.3868
Potencia de la bomba (HP)	3.354

Nota: 1HP = 745.70W

Del análisis de los resultados se determinó una bomba con una potencia real de 3.35 HP. Por lo tanto la potencia teórica sería su inmediato superior 3.5 HP.

6.3.2. Diseño del flujo del agua.

Las Figuras 13,14 y 15 muestran el diseño del flujo de intercambio del agua entre pilas integradas con tubo de 1.5" y 2" de diámetro nominal. La disposición de la bomba se definió de manera que su posición represente el menor trabajo para el intercambio del fluido (mas detalles ver Anexos 12, 13 y 14).

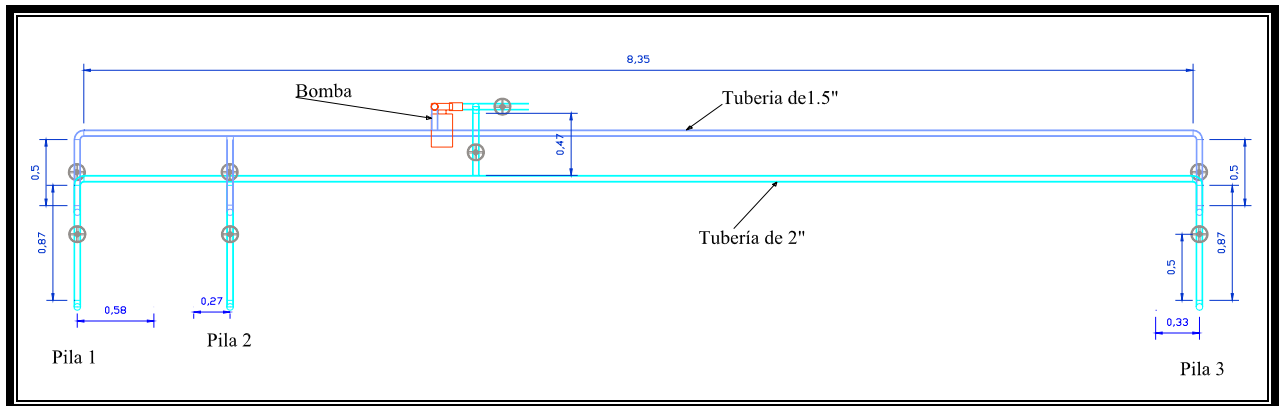


Figura 13. Diseño del flujo para el intercambio del agua entre pilas.

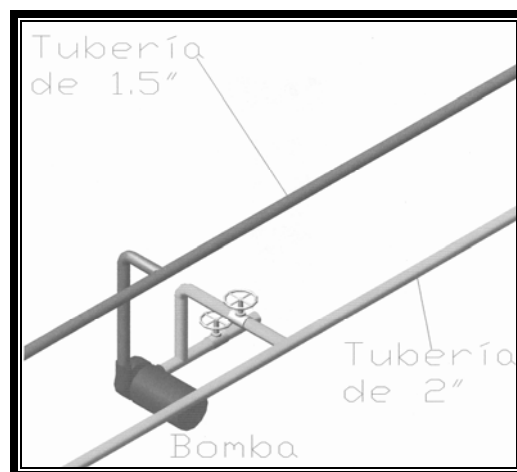


Figura 14. Conexión de tubería de 2" a la entrada de la bomba.

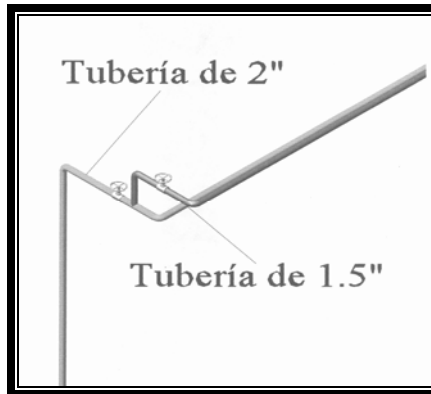


Figura 15. Conexión de la tubería para el intercambio del agua entre pilas.

6.4. Control de temperaturas del proceso de ablandamiento.

En función de las características del líquido termoconductor del proceso (aceite térmico), para el calentamiento del agua utilizada en el ablandamiento de la trocería, se determinó instalar válvulas tipo globo de 4" de diámetro con actuadores de $\frac{1}{4}$ de vuelta y puertos de $\frac{1}{4}$ ", operados en forma neumática por medio de una válvula solenoide 4/1 con puertos de $\frac{1}{4}$ " (detalles ver Anexo 15), que se manipulará con un controlador de temperaturas multirango, conectado a los sensores que estarán colocados en las pilas de calentamiento (Figura 16).



Figura. 16. Esquema de conexión de válvula, actuador, controlador y de los sensores.

El sistema de recirculación del aceite térmico se integro con un cabezal doble con sus respectivas válvulas para regular y definir el sentido del flujo del aceite y a la vez la temperatura de cada una de las pilas de calentamiento (detalles ver Anexos 16, 17 y 18).

6.5. Sistema de transporte de las trozas.

Para el sistema de transporte de las trozas desde el área de descortezado a las pilas de calentamiento se contempló un sistema por medio de una grúa viajera de 1 puente con una capacidad de 5000 kg (Figuras 16 y 17, datos técnicos ver Anexo 19).

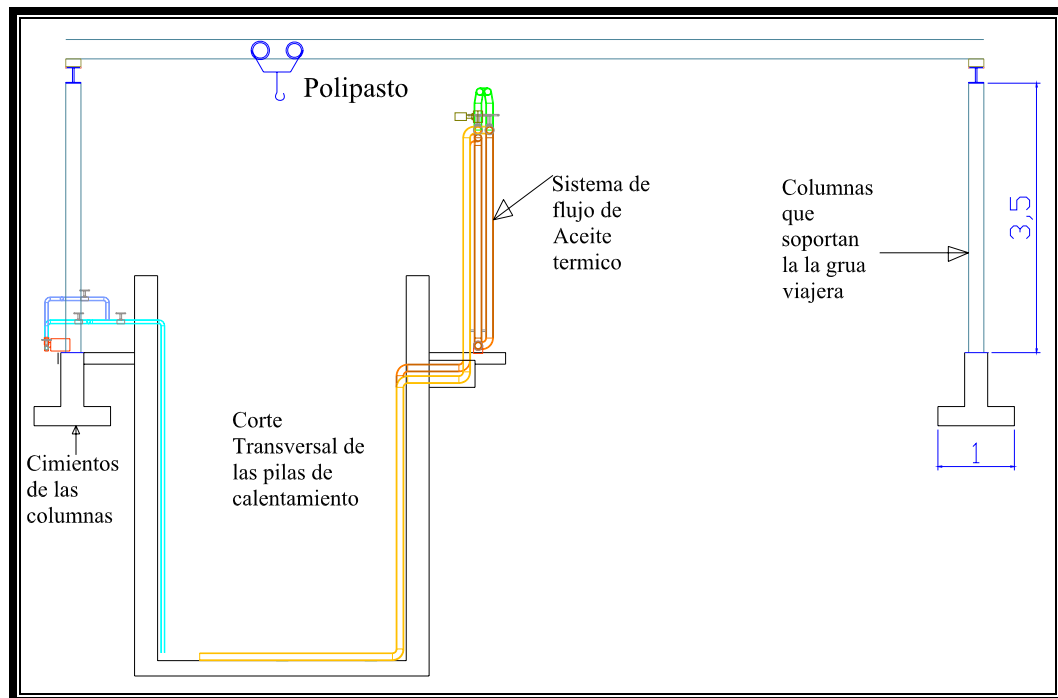


Figura 17. Esquema de ubicación de la grúa viajera y el puente.

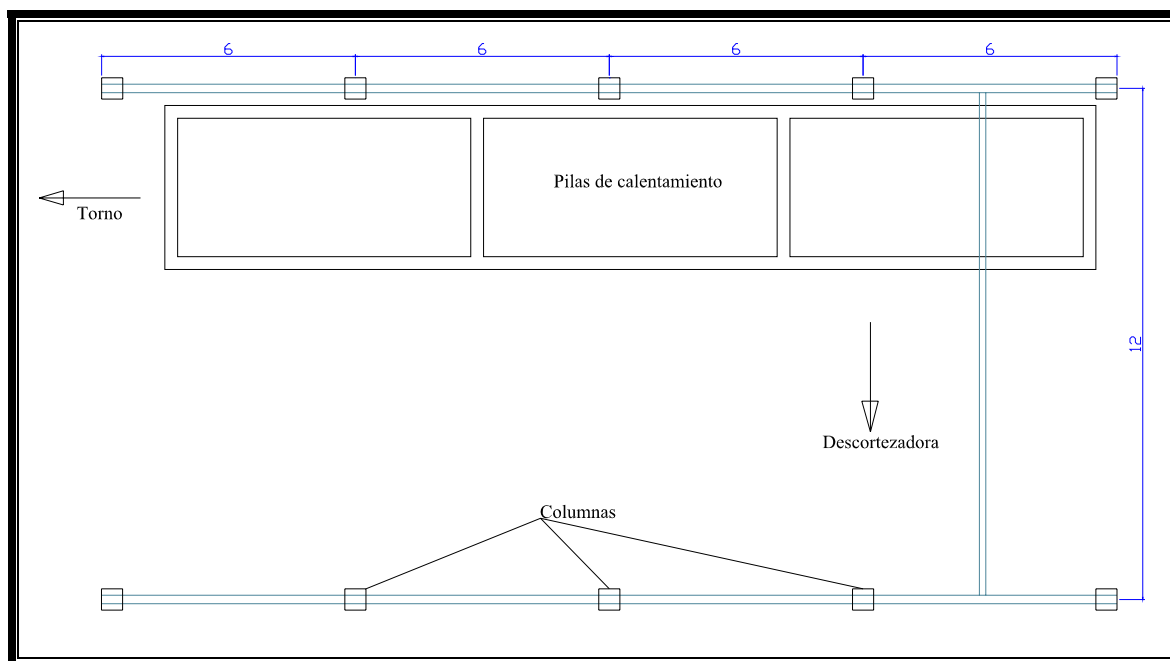


Figura 17. Esquema de ubicación de las columnas que soportan la Grau viajera.

6.6. Costo de las pilas de calentamiento.

El costo total de las pilas de calentamiento para una capacidad de 150 m³ rollo de trocería de pino fue de 966,494.04, sin tomar en cuenta el costo de la mano de obra para la instalación del sistema de intercambio del agua entre pilas. Los costos generalizados se muestran en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Costo de las pilas de ablandamiento.

Concepto	Costos (\$)		
	Materiales	Mano de obra	Total
Construcción de las pilas de calentamiento	351,955.64	133,963.42	485,919.06
Serpentines	120,000	Incluido	120,000
Sistema de Control de temperaturas	15,944.98	Incluido	15,944.98
Bomba de aceite termico	35,000		35,000
Grúa viajera	344,080.00		344,080.00
Sistema de intercambio del agua entre pilas	10,550		10,550
Total	877,530.62	133,963.42	1,011,494.04

7. CONCLUSIONES.

1. Para la optimización del proceso de calentamiento de la trocería específico para la empresa analizada en este proyecto para 150 m^3 de trocería con un coeficiente de apilamiento de 70 %, se determinó que necesitan tres pilas de calentamiento de 6.93 m de largo, 3.25 m de ancho y 5 m de altura de dimensiones interiores.
2. Para poder llevar a cabo el proceso de ablandamiento de la trocería de pino en un tiempo aproximado de 36 horas se requiere un total de 589,817.4563 Kcal/ hr.
3. Al área mínima de transferencia de calor deberá ser de 37 m^2 lo que corresponde aproximadamente a 67 m de tubería de fierro negro 2" de diámetro nominal cedula 40 por pila de calentamiento.
4. Para poder suministrar el total de calor requerido para el proceso de ablandamiento de la trocería se necesitará un gasto de aceite térmico de $0.0112 \text{ m}^3/\text{s}$ a una velocidad promedio hacia los serpentines de 2.5878 m/s.
5. Para suministrar el gasto de aceite térmico requerido se necesita una bomba con una potencia de 20 HP.
6. Para el intercambio del agua entre pilas se determinó utilizar una bomba con una potencia de 3.5 HP para el intercambio del liquido en un tiempo promedio de 2.5 horas.
7. Para el transporte de la trocería del área de descortezado a las pilas de calentamiento se contempló grúa con un polipasto de 5 toneladas.

8. RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda que para próximas construcciones de pilas de ablandamiento de trocería se determine la posibilidad de su construcción con tabicón, buscando economizar el proyecto, previo análisis de las posibles pérdidas de calor por los muros.
2. Para evitar acumulación de basura (corteza) en las pilas de ablandamiento así como el incremento del tiempo de calentamiento de la trocería, se recomienda descortezarlas primeramente.
3. Para optimizar el proceso de ablandamiento de la trocería se recomienda determinar secuelas o programas de calentamiento de la trocería, clasificadas por especies y diámetros.
4. Para determinar el tiempo óptimo de calentamiento de la trocería, se requiere definir el periodo en el cual se logra la temperatura de corte requerida en el centro de las trozas, que para el caso del pino es de 45 °C.
5. Para el mejor funcionamiento de las pilas de calentamiento se recomienda que en construcciones futuras con sistema de control automático, se diseñe un sistema de reflujo individual por pilas de calentamiento, sin perder el objetivo de la rentabilidad del sistema.
6. Se recomienda anexar un sistema que permita hacer el movimiento del agua por cada pila de calentamiento, con la finalidad de homogenizar la temperatura del agua durante el proceso.
7. Para evitar periodos prolongados de calentamiento de la trocería se recomienda revisar el pH del agua para tratarla cuando sea inferior a 5, con la finalidad de conservar sus cualidades para transferir el calor a la madera durante el proceso.

9. BIBLIOGRAFIA.

Ambriz P, J, E. 2002. Diseño de una planta de impregnación de madera para preservadores hidrosolubles Tesis de M.C. y Tecnología de la Madera. UMSNH. 130 pp.

Bocanegra, O, S. 2000. Diseño, construcción y funcionamiento de una estufa de secado para madera a base de leña con intercambiador de calor. Tesis de M.C. y Tecnología de la madera. UMSNH. 46 pp.

Fiel O. and Godin. V. 1975. Heating Veneer Logs: A Practical Guide. Eastern Forest Products Laboratory Canadian Forestry Service Ottawa, Ontario. Department of the Environment. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 9, Ottawa, Ontario. 20 pp.

Fleischer, C, H, O. 1959. Heating rates for logs, bolts, and flitches to be cut into venner. Division of Timber Processing, Products Laboratory, Forest Service U. S. Department of Agriculture. 20 pp. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplmisc/rpt2149.pdf> consultado el día 6 de junio del 2006.

Foust, A, S; Wenzel, L, A; Clump, C, W y Andersen, L, B. 2001. Principios de operaciones unitarias. Segunda edición. Octava impresión México 2001. Editorial Continental. 751 pp.

García D, R. 2004. Manual de fórmulas de ingeniería. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México, D.F. 307 pp.

Geankoplis, C, J. 1998. Proceso de transporte y operaciones unitarias. Principios de transferencia de momento. Tercera edición. Editorial Continental, S.A. de C.V. México. 38-129 pp.

Incropera, F, P. 1999. Fundamentos de transferencia de calor. Intercambiadores de calor Cuarta edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México. 581-618 pp.

Kern, D, Q. 1965. Proceso de transferencia de calor. Conducción. Primera edición al español 1965. Novena impresión 1974. Editorial Continental, S.A. 19-42 pp.

Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Traducida de la segunda edición alemana por el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera. Tomo primero. Impreso en España 554-576 pp.

Mortensen, A, W. 1974. Block conditioning methods for improve panel yield. Modern plywood Techniques. In proceedings of the second plywood clinic. Vol. 2. New Orleans, Louisiana. U. S. A. 27-46 pp.

Perry, R, H; Green, D, W y Maloney, J, O. 1992. Manual del Ingeniero Químico. Perry. Sexta edición. Ma Graw Hill. Tomo I. Impreso en México. p 6-1, 6-129.

Peter, C, W. 1974. Peeler Block Conditioning. Proceedings of the First Plywood Clinic. Vol. 1. Portland, Oregon U.S.A. 30-38 pp.

Ruiz T, R. 2002. Análisis del proceso de calentamiento de trocería para la producción de chapa de pino en la Fábrica de Guitarras y Contrachapados S.A. DE C.V. en Paracho Michoacán. Tesis de Ingeniero en Tecnología de la Madera. UMSNH. 45 pp.

Sellers, T, Jr. 1985. Plywood and Adhesive Technology. Marcel Dekker Inc. New York. U.S.A. 661 pp.

Smith, A, C. y Corropio, B, A. 1999. Control automático del proceso teoría y practica. Editorial Limusa. Tercera edición. México. 647-702 pp.

Steinhagen, H. P. 2005. Veneer block conditioning manual for veneer and plywood production. . *Maderas, Cienc. tecnol.*. [online]. Vol.7, no.1 [citado 04 Julio 2006], 49-56 p. Disponible en la World Wide Web: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2005000100006&lng=es&nrm=iso. ISSN 0718-221X. Consultado el día 04 de julio del 2006.

Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. UMSNH.

Valiente, B, A. 1988. Problemas de transferencia de calor. Editorial Limusa. Primera edición. México. 586 pp.

Viejo, Z, M. 1975. Tuberías, válvulas y accesorios en equipos de bombeo. Bombas teoría, diseño y aplicaciones. Segunda edición. Editorial Limusa. México 183-207 pp.

Enciclopedia de los Municipios de México. Papasquiario Santiago, Durango. www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/durango/mpios/10032a.htm. Consultado el día 16 de agosto del 2006.

Zavala, Z, D y Rubio 1997. Análisis del proceso de ablandamiento de trocería de encinos para la producción de chapa para madera contrachapada (*triplay*), Centro de Investigación Regional-PACIFICO CENTRO. INIFAP, 53-64 p.
<http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumeness/4.1/pdf/Zavala%20y%20Lara%201998.pdf>. Consultado el día 6 de junio del 2006.

Zavala, Z, D. 1991. Diagnostico de la industria de tableros contrachapados en el área metropolitana del D.F. Instituto Nacional de Investigadores Forestales y Agropecuarias. S.A.R.H. Revista Ciencia Forestal en México Vol. 15. N° 68. 61-83 pp.

Zavala, Z, D. y Trujillo A, G. 1993. Análisis del proceso de calentamiento de trocería para la producción de chapa. Instituto Nacional de Investigadores Forestales y Agropecuarias. S A R H. Revista Ciencia Forestal en México Vol. 18. 139-162 pp.

10. ANEXOS.

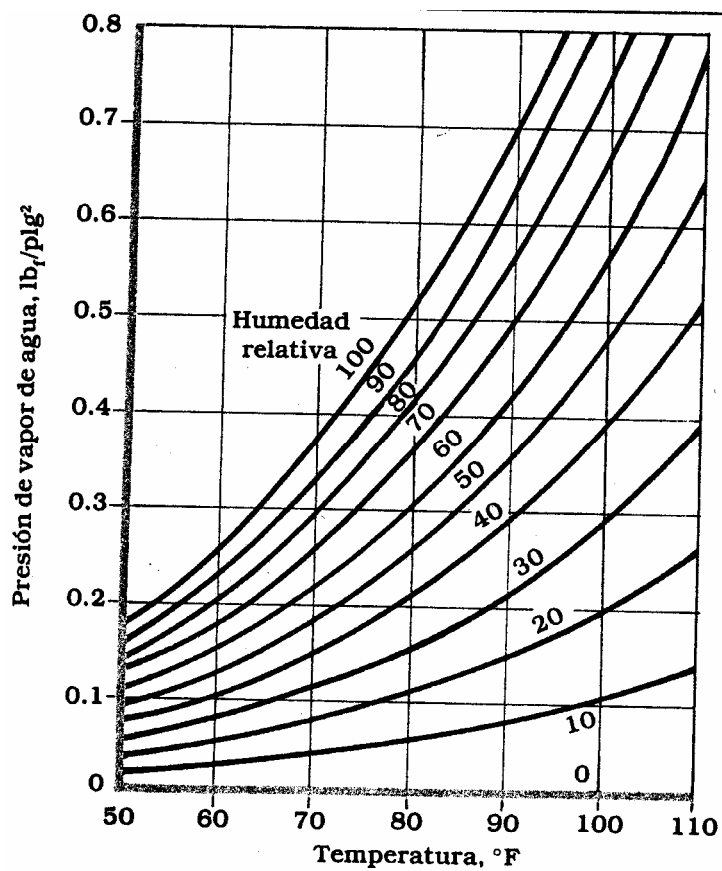
Anexo 1. Calor específico de diversos líquidos y sólidos

Material	Calor específico, cal./g °C	Material	Calor específico, cal./g °C
Aceites de alquitrán de hulla	0.34 (15° a 90° C)	Granito	0.20 (20° a 100° C)
Acero	0.12	Hormigón (concreto).	0.156 (21° a 153° C); 0.219 (22° a 800° C)
Alquitranes de hulla	0.35 (40° C); 0.45 (200° C)	Keroseno	0.47
Alúmina	0.2 (100° C); 0.274 (1 500° C)	Ladrillo, de arcilla refractaria	0.198 (100° C); 0.298 (1 500° C)
Alundum	0.186 (100° C.)	de cromita	0.17
Arcilla	0.224	de magnesita	0.222 (100° C); 0.195 (1 500° C)
Arena	0.191	obra de	Alrededor de 0.2
Asbestos	0.25	Litargirio	0.055
Asfalto	0.22	Madera	
Bakelita	0.3 a 0.4	la mayoría de las maderas varia entre	0.45 y 0.65
Caliza, piedra	0.217	roble	0.570
Carbón	0.168 (26° a 76° C); 0.314 (40° a 892° C); 0.387 (56° a 1 400° C)	Magnesia	0.234 (100° C); 0.188 (1 500° C)
de hulla	0.26 a 0.37	Mármol	0.21 (18° C)
(de retorta de gas).	0.204	Piedra	Alrededor de 0.2
(Véase abajo, grafito) vegetal o de madera	0.242	Piritas, de cobre	0.131 (19° a 50° C)
Celulosa	0.32	de hierro	0.136 (15° a 98° C)
Cemento, clinca Portland	0.186	Sílice	0.316
Coque	0.265 (21° a 400° C); 0.359 (21° a 800° C); 0.403 (21° a 1 300° C); 0.253 (16° a 55° C.)	Trementina	0.42 (18° C)
Criolita	0.17 (0° C); 0.28 (350° C)	Vidrio (crown)	0.16 a 0.20
Cuarzo	0.147	(flint)	0.117
Diamante	0.21 (30° C)	lana de	0.157
Espato flúor	0.53	(pyrex)	0.20
Gasolina	0.165 (26° a 76° C); 0.390 (56° a 1 450° C)	(silicato)	0.188 a 0.204 (0 a 100° C) 0.24 a 0.26 (0 a 700° C)
Grafito		Yeso	0.259 (16° a 46° C)

Anexo 2. Densidad de diversos materiales.

Sustancia	Densidad relativa	Peso promedio, lb/ft ³	Sustancia	Densidad relativa	Peso promedio, lb/ft ³	Sustancia	Densidad relativa	Peso promedio, lb/ft ³
Metales, aleac. y miner.			Mad. de const. desec. al aire			Mampostería seca		
Aluminio fundido y martillado	2.55-2.80	165	Manzano	0.66-0.74	44	Granito, sienita, gneiss	1.9-2.3	130
Bronce	7.7	481	Fresno, negro	0.55	34	Caliza, mármol	1.9-2.1	125
Latón, fundido y laminado	8.4-8.7	534	blanco	0.64-0.71	42	Arenisca, piedra azul	1.8-1.9	110
bronce, 7.9 a 14% Sn	7.4-8.9	509	Abedul amarillo, dulce	0.71-0.72	44			
al fósforo	8.88	554	Cedro, blanco, rojo	0.35	22			
						Obras de ladrillos		
Cobre, fundido y laminado	8.8-8.95	556	Cerezo, guinda	0.43	27	Ladrillo duro	1.8-2.3	128
Mineral, piritas	4.1-4.3	262	Castaño	0.48	30	Ladrillo medio	1.6-2.0	112
Plata alemana	8.58	536	Ciprés	0.45-0.48	29	Ladrillo blando	1.4-1.9	103
Oro, fundido y martillado	19.25-19.35	1205	Olmo, blanco	0.56	35	Ladrillo de arena y cal	1.4-2.2	112
acuñado (EUA)	17.18-17.2	1073	Abeto, del Canadá	0.48-0.55	32			
						Concreto u hormigonado		
Iridio	21.78-22.42	1383	bálsamo	0.40	25	Cemento, piedras, arena	2.2-2.4	144
Hierro, fundición gris	7.03-7.13	442	Pinabete	0.45-0.50	29	de escorias, etc.	1.9-2.3	130
colado, arrabio	7.2	450	Nogal americano, pacana	0.74-0.80	48	cenizas, etc.	1.5-1.7	100
forjado	7.6-7.9	485	Algarrobo	0.67-0.77	45			
especial (spiegeleisen)	7.5	468	Caoba	0.56-0.85	44	Materiales diversos de construcción		
						Cenizas, carbonilla	0.64-0.72	40-45
ferrosilicio	6.7-7.3	437	Arce, melífero	0.68	43	Cemento Portland, suelto	1.5	94
mineral, hematita	5.2	325	blanco	0.53	33	Cal, yeso, sueltos	0.85-1.00	53-64
mineral, limonita	3.6-4.0	237	Roble, castaño	0.74	46	Mortero, cal, fraguado	1.4-1.9	103
mineral, magnetita	4.9-5.2	315	Encina perenne	0.87	54	de cemento Portland	2.08-2.25	94-135
escoria	2.5-3.0	172	Roble rojo, negro	0.64-0.71	42			
						Cemento Portland	3.1-3.2	196
Plomo	11.34	710	Roble blanco	0.77	48	Escorias cribadas	1.1-1.2	67-72
mineral, galena	7.3-7.6	465	Pino, de Noruega	0.55	34	sin cribar	1.5-1.9	98-117
Manganeso	7.42	475	de Oregon	0.51	32	trituras a máquina	1.5	96
mineral, pirolusita	3.7-4.6	259	rojo	0.48	30	con arena	0.8-0.9	49-55
Mercurio	13.6	849	sueño	0.61-0.67	38-42			
			blanco	0.43	27	Tierra excavada, etc.		
Metal monel, laminado	8.97	555				Arcilla, seca	1.0	63
Níquel	8.9	537	Álamo	0.43	27	plástica, húmeda	1.76	110
Platino, fundido y martillado	21.5	1330	Secoya de California	0.42	26	y grava, seca	1.6	100
Plata, fundida y martillada	10.4-10.6	656	Abeto, blanco, rojo	0.45	28	Tierra seca, suelta	1.2	76
Acero, estirado en frío	7.83	489	Teca, africana	0.99	62	seca, prensada	1.5	95
de máquinas	7.80	487	De la India	0.66-0.88	48	húmeda, suelta	1.3	78
de herramientas	7.70-7.73	481	Nogal, negro o europeo	0.59	37	húmeda, prensada	1.6	96
Estño, fundido y martillado	7.2-7.5	459	Sauce	0.42-0.50	28	barro, fluido	1.7	108
casiterita	6.4-7.0	418				barro, prensado	1.8	115
Tungsteno	19.22	1200				Escolleras, caliza	1.3-1.4	80-85
			Diversos líquidos					
Cinc, fundido y laminado	6.9-7.2	440	Alcohol, etílico (100%)	0.789	49	Escolleras, arenisca	1.4	90
blenda	3.9-4.2	253	metílico (100%)	0.796	50	Escolleras, esquistos arcillosos	1.7	105
			Ácido, muriático, 40%	1.20	75	Arena, grava, seca, sueltas	1.4-1.7	90-105
Diversos sólidos			nítrico, 91%	1.50	94	grava seca, compactada	1.6-1.9	100-120
Cereales, avena, a granel	0.51	26	sulfúrico, 87%	1.80	112	grava mojada	1.89-2.16	126
cebada, a granel	0.62	39						
maíz, centeno, a granel	0.73	45	Cloroformo	1.500	95	Excavaciones en agua		
trigo, a granel	0.77	48	Éter	0.736	46	Arcilla	1.28	80
Corcho	0.22-0.26	15	Lejía, sosa, 66%	1.70	106	Lama de ríos	1.44	90
			Aceites, vegetales	0.91-0.94	58	Arena o grava	0.96	60
Algodón, lino, cáñamo	1.47-1.50	93	minerales, lubricantes	0.88-0.94	57	y arcilla	1.00	65
Grasas	0.90-0.97	58				Tierra	1.12	70
Harina, suelta	0.40-0.50	28	Trementina	0.861-0.867	54	Escollera de piedra	1.00	65
prensada	0.70-0.80	47	Agua, 4°C, densidad máxima	1.0	62.428			
Vidrio, común	2.40-2.80	162	100°C	0.9584	59.830	Minerales		
			hielo	0.88-0.92	56	Asbestos	2.1-2.8	153
crystal	2.90-3.00	184	nieve recién caída	0.125	8	Barita	4.50	281
de roca	3.2-4.7	247				Basalto	2.7-3.2	184
lunas	2.45-2.72	161	agua del mar	1.02-1.03	64	Bauxita	2.55	159
Heno y paja, en placas	0.32	20				Piedra azul	2.5-2.6	159
Cuero	0.86-1.02	59	Piedras de sillaría					
			Piedra azul	2.3-2.6	153	Bórax	1.7-1.8	109
Papel	0.70-1.15	58	Granito, sienita, gneiss	2.4-2.7	159	Greda	1.8-2.8	143
Papas, amontonada	0.67	44	Caliza	2.1-2.8	153	Arcilla, marga	1.8-2.6	137
Caucho	0.92-0.96	59	Mármol	2.4-2.8	162	Dolomita	2.9	181
artículos de	1.0-2.0	94	Arenisca	2.0-2.6	143	Feldespato, ortoclasa	2.5-2.7	162
Sal, granulada, amontonada	0.77	48						
			Mampostería					
Salitre	1.07	67	Piedra azul	2.2-2.5	147	Gneiss	2.7-2.9	175
Almidón	1.53	96	Granito, sienita, gneiss	2.3-2.6	153	Granito	2.6-2.7	165
Azufre	1.93-2.07	125	Caliza	2.0-2.7	147	Apatita verde, trapeana	2.8-3.2	187
Lana	1.32	82	Mármol	2.3-2.7	156	Yeso, alabastro	2.3-2.8	159
			Arenisca	1.9-2.5	137	Hornblendo	3.0	187
						Caliza	2.1-2.86	155
						Mármol	2.6-2.86	170
						Magnesita	3.0	187
						Roca de fosfato, apatita	3.2	200
						Pórfido	2.6-2.9	172

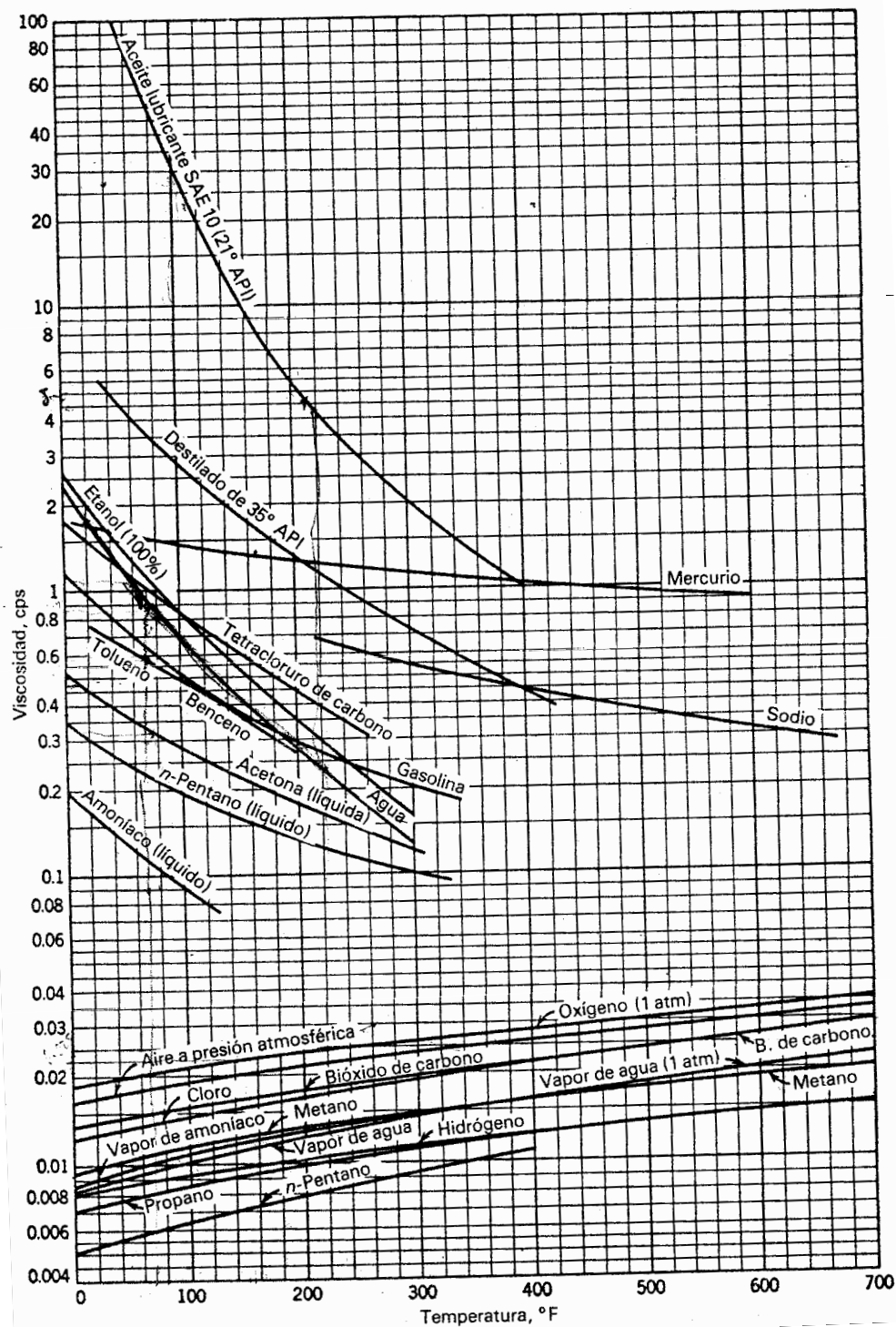
Anexo 3. Relación entre la presión de vapor del agua, de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.



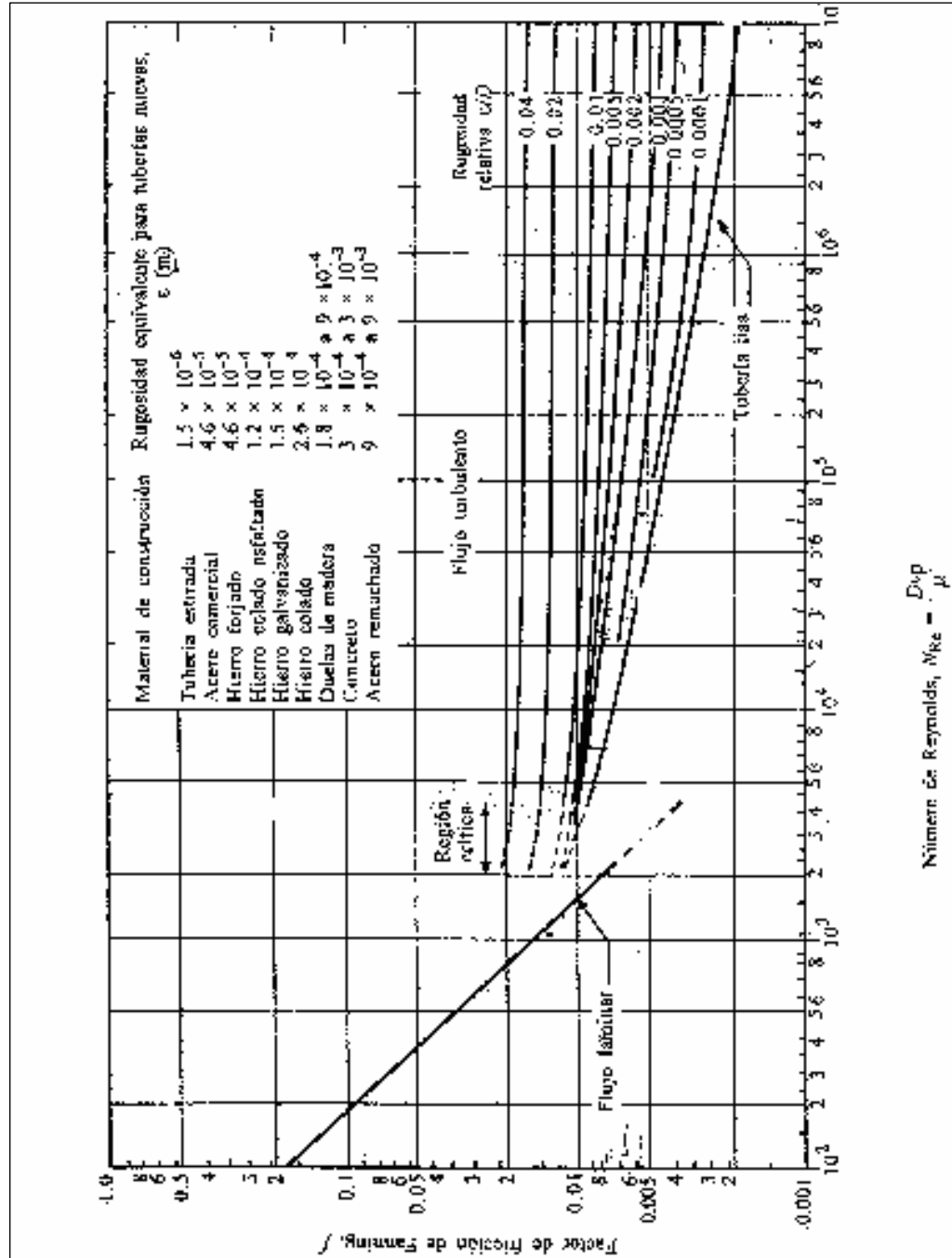
Anexo 4. Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica.

Temperatura, T (K)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\alpha_s \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expansión $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura T (K)
	$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

Anexo 5. Viscosidades de gases y líquidos en función de la temperatura a 1 atm.



Anexo 6. Factor de fricción para fluidos en tuberías.



Anexo 7. Pérdidas por fricción, número de cargas de velocidad K_f

<i>Tipo de accesorio o válvula</i>	<i>Pérdida por fricción, número de cargas de velocidad K_f</i>	<i>Pérdida por fricción, longitud equivalente de tubería recta en diámetros de tubería L_e/D</i>
Codo, 45°	0.35	17
Codo, 90°	0.75	35
Te	1	50
Retorno en U	1.5	75
Manguitos de acoplamiento	0.04	2
Manguitos de unión	0.04	2
Válvulas de compuerta		
Abiertas	0.17	9
Semiabiertas	4.5	225
Válvulas de globo		
Abiertas	6.0	300
Semiabiertas	9.5	475
Válvulas de ángulo, abiertas	2.0	100
Válvula de retención		
De bola	70.0	3500
De bisagra	2.0	100
Medidor de agua, disco	7.0	350

Anexo 8. Dimensiones de tuberías de acero.

Tamaño nominal de la tubería (pulg.)	Diámetro externo		Espesor de la pared	Diámetro interno		Área de corte transversal interna	
	pulg.	mm		pulg.	mm	pie ²	m ² x 10 ³
$\frac{1}{8}$	0.4195	10.29	40	0.068	1.73	0.00040	0.3664
			80	0.095	2.41	0.00025	0.2341
$\frac{1}{4}$	0.540	13.72	40	0.088	2.24	0.00072	0.6720
			80	0.119	3.02	0.00050	0.4620
$\frac{3}{8}$	0.675	17.15	40	0.091	2.31	0.00133	1.231
			80	0.126	3.20	0.00098	0.9059
$\frac{1}{2}$	0.850	21.34	40	0.109	2.77	0.00211	1.961
			80	0.147	3.73	0.00163	1.511
$\frac{3}{4}$	1.050	26.67	40	0.113	2.87	0.00371	3.441
			80	0.154	3.91	0.00306	2.791
1	1.315	33.40	40	0.133	3.38	0.00600	5.574
			80	0.179	4.45	0.00499	4.641
1 $\frac{1}{2}$	1.660	42.16	40	0.140	3.56	0.01040	9.648
			80	0.191	4.85	0.00891	8.275
1 $\frac{3}{4}$	1.900	48.26	40	0.145	3.68	0.01414	13.13
			80	0.200	5.08	0.01225	11.40
2	2.375	60.33	40	0.154	3.91	0.02330	21.65
			80	0.218	5.54	0.02050	19.05
2 $\frac{1}{2}$	2.875	73.03	40	0.203	5.16	0.03322	30.89
			80	0.276	7.01	0.02942	27.30
3	3.500	88.90	40	0.216	5.49	0.05130	47.69
			80	0.300	7.62	0.04587	42.61
3 $\frac{1}{2}$	4.000	101.6	40	0.236	5.74	0.06870	63.79
			80	0.318	8.08	0.06170	57.35
4	4.500	114.3	40	0.237	6.02	0.08840	82.19
			80	0.377	9.56	0.07986	74.17
5	5.563	141.3	40	0.258	6.55	0.1390	129.1
			80	0.375	9.53	0.1263	117.5
6	6.625	168.3	40	0.280	7.11	0.2006	186.5
			80	0.432	10.97	0.1810	168.1
8	8.625	219.3	40	0.323	8.18	0.3474	322.7
			80	0.500	12.70	0.3171	294.7

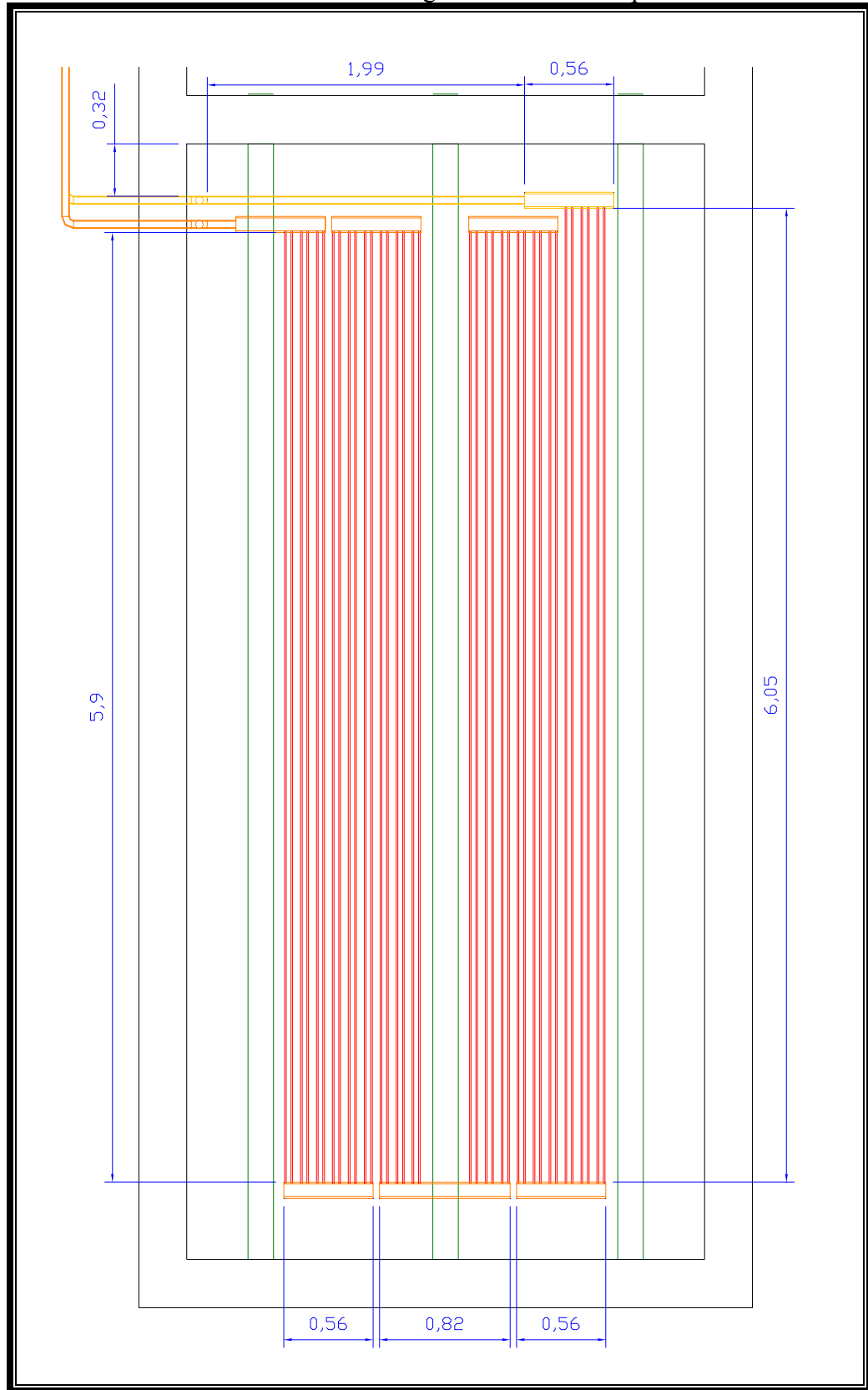
Anexo 9. Propiedades termofísicas de fluidos saturados.

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^2$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$\alpha \cdot 10^7$ (K ⁻¹)
Aceite de motor (sin usar)								
273	899.1	1.796	385	4,280	147	0.910	47,000	0.70
280	895.3	1.827	217	2,430	144	0.880	27,500	0.70
290	890.0	1.868	99.9	1,120	145	0.872	12,900	0.70
300	884.1	1.909	48.6	550	145	0.859	6,400	0.70
310	877.9	1.951	25.3	288	145	0.847	3,400	0.70
320	871.8	1.993	14.1	161	143	0.823	1,965	0.70
330	865.8	2.035	8.36	96.6	141	0.800	1,205	0.70
340	859.9	2.076	5.31	61.7	139	0.779	793	0.70
350	853.9	2.118	3.56	41.7	138	0.763	546	0.70
360	847.8	2.161	2.52	29.7	138	0.753	395	0.70
370	841.8	2.206	1.86	22.0	137	0.738	300	0.70
380	836.0	2.250	1.41	16.9	136	0.723	233	0.70
390	830.6	2.294	1.10	13.3	135	0.709	187	0.70
400	825.1	2.337	0.874	10.6	134	0.695	152	0.70
410	818.9	2.381	0.698	8.52	133	0.682	125	0.70
420	812.1	2.427	0.564	6.94	133	0.675	103	0.70
430	806.5	2.471	0.470	5.83	132	0.662	88	0.70
Etilenglicol [C₂H₄(OH)₂]								
273	1,130.8	2.294	6.51	57.6	242	0.933	617	0.65
280	1,125.8	2.323	4.20	37.3	244	0.933	400	0.65
290	1,118.8	2.368	2.47	22.1	248	0.936	236	0.65
300	1,114.4	2.415	1.57	14.1	252	0.939	151	0.65
310	1,103.7	2.460	1.07	9.65	255	0.939	103	0.65
320	1,096.2	2.505	0.757	6.91	258	0.940	73.5	0.65
330	1,089.5	2.549	0.561	5.15	260	0.936	55.0	0.65
340	1,083.8	2.592	0.431	3.98	261	0.929	42.8	0.65
350	1,079.0	2.637	0.342	3.17	261	0.917	34.6	0.65
360	1,074.0	2.682	0.278	2.59	261	0.906	28.6	0.65
370	1,066.7	2.728	0.228	2.14	262	0.900	23.7	0.65
373	1,058.5	2.742	0.215	2.03	263	0.906	22.4	0.65
Glicerina [C₃H₅(OH)₃]								
273	1,276.0	2.261	1,060	8,310	282	0.977	85,000	0.47
280	1,271.9	2.298	534	4,200	284	0.972	43,200	0.47
290	1,265.8	2.367	185	1,460	286	0.955	15,300	0.48
300	1,259.9	2.427	79.9	634	286	0.935	6,780	0.48
310	1,253.9	2.490	35.2	281	286	0.916	3,060	0.49
320	1,247.2	2.564	21.0	168	287	0.897	1,870	0.50

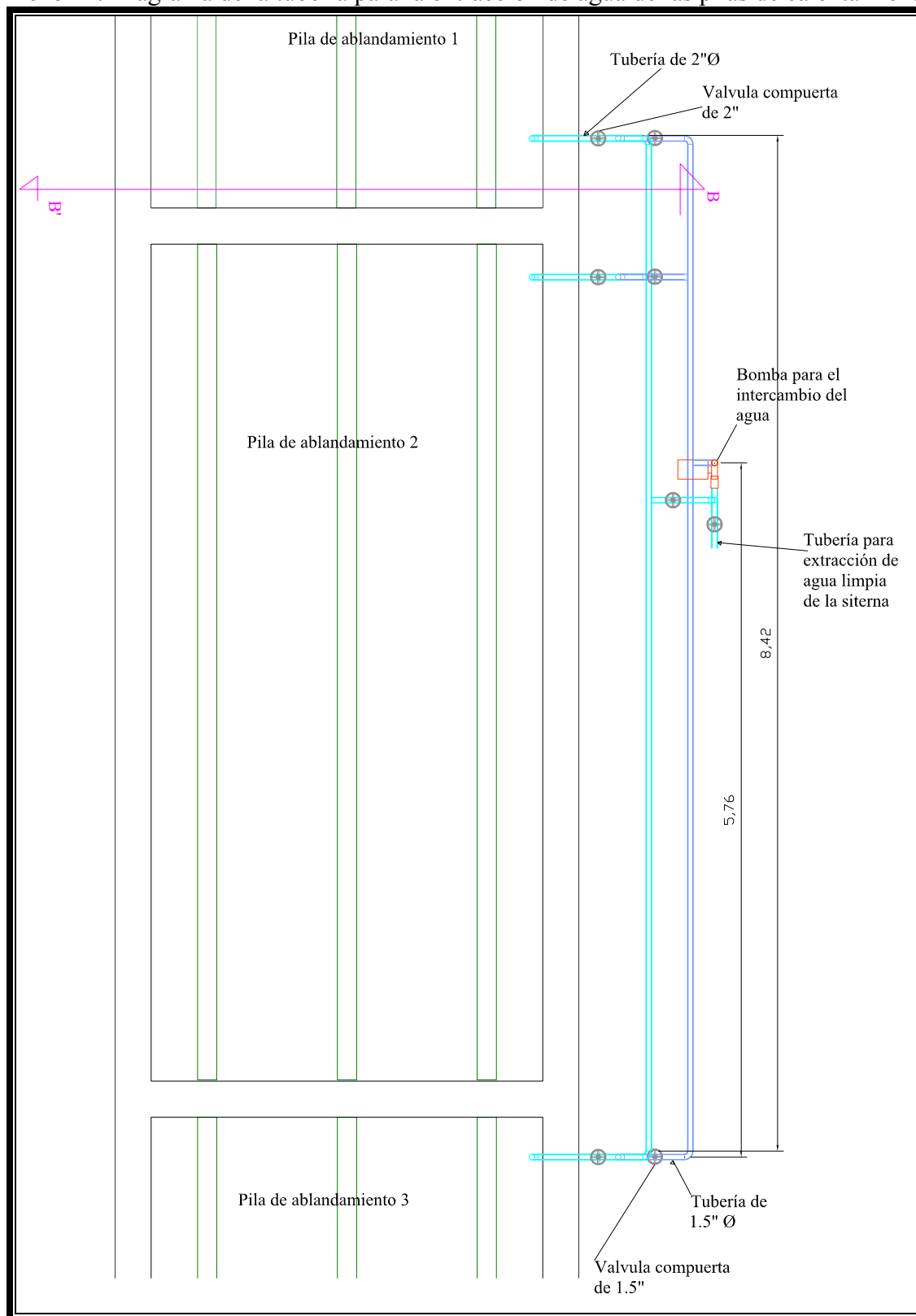
Anexo 10. Longitudes equivalentes expresadas en metros de tubería rectilínea.

Diámetro <i>D</i> mm	Codo			Cruce			Entrada completa de fondo			Válvula tipo globe			Válvula de construcción tipo flange			Válvula de construcción tipo flange			Válvula de construcción tipo flange			Válvula de construcción tipo flange		
	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°	90°	45°	135°
13	0.3	0.4	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	4.9	2.6	0.3	1.0	1.0	3.6	0.4	1.1	1.6			
19	0.4	0.6	0.7	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1	6.7	3.6	0.4	1.4	1.4	5.6	0.5	1.6	2.4			
25	0.5	0.7	0.8	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.3	0.7	0.2	0.2	8.2	4.6	0.5	1.7	1.7	7.3	0.7	2.1	3.2			
32	0.7	0.9	1.1	0.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.4	0.9	0.2	0.2	11.3	5.6	0.7	2.3	2.3	10.0	0.9	2.7	4.0			
38	0.9	1.1	1.3	0.6	0.5	0.7	0.3	0.5	0.5	1.0	0.3	0.3	13.4	6.7	0.9	2.8	2.8	11.6	1.0	3.2	4.8			
50	1.1	1.4	1.7	0.8	0.6	0.9	0.4	0.7	0.7	1.5	0.4	0.4	17.4	8.5	1.1	3.5	3.5	14.0	1.5	4.2	6.4			
63	1.3	1.7	2.0	0.9	0.8	1.0	0.5	0.9	0.9	1.9	0.4	0.4	21.0	10.0	1.3	4.3	4.3	17.0	1.9	5.2	8.1			
75	1.6	2.1	2.5	1.2	1.0	1.3	0.6	1.1	1.1	2.2	0.5	0.5	26.0	13.0	1.6	5.2	5.2	20.0	2.2	6.3	9.7			
100	2.1	2.8	3.4	1.5	1.3	1.6	0.7	1.6	1.6	3.2	0.7	0.7	34.0	17.0	2.1	6.7	6.7	23.0	3.2	8.4	12.9			
125	2.7	3.7	4.3	1.9	1.6	2.1	0.9	2.0	2.0	4.0	0.9	0.9	43.0	21.0	2.7	8.4	8.4	30.0	4.0	10.4	16.1			
150	3.4	4.3	4.9	2.3	1.9	2.5	1.1	2.5	2.5	5.0	1.1	1.1	51.0	26.0	3.4	10.0	10.0	39.0	5.0	12.5	19.3			
200	4.3	5.5	6.4	3.0	2.4	3.3	1.5	3.5	3.5	6.0	1.4	1.4	67.0	34.0	4.3	13.0	13.0	52.0	6.0	16.0	25.0			
250	5.5	6.7	7.9	3.8	3.0	4.1	1.8	4.5	4.5	7.5	1.7	1.7	85.0	43.0	5.5	16.0	16.0	65.0	7.5	20.0	32.0			
300	6.1	7.9	9.5	4.6	3.6	4.8	2.2	5.5	5.5	9.0	2.1	2.1	102.0	51.0	6.1	19.0	19.0	78.0	9.0	24.0	38.0			
350	7.3	9.5	10.5	5.3	4.4	5.4	2.5	6.2	6.2	11.0	2.4	2.4	120.0	60.0	7.3	22.0	22.0	90.0	11.0	28.0	45.0			

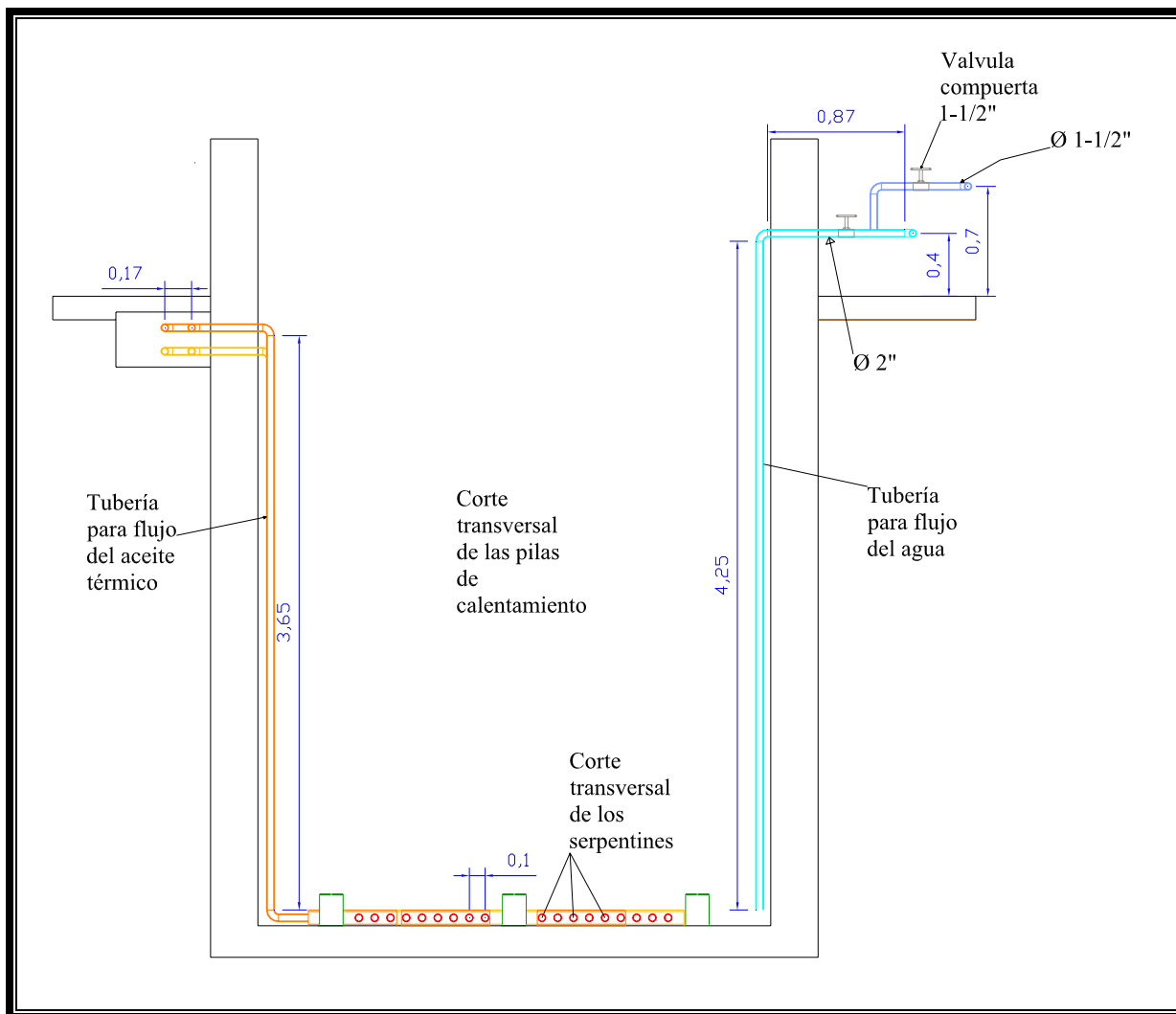
Anexo 11. Dimensiones generales de los serpentines



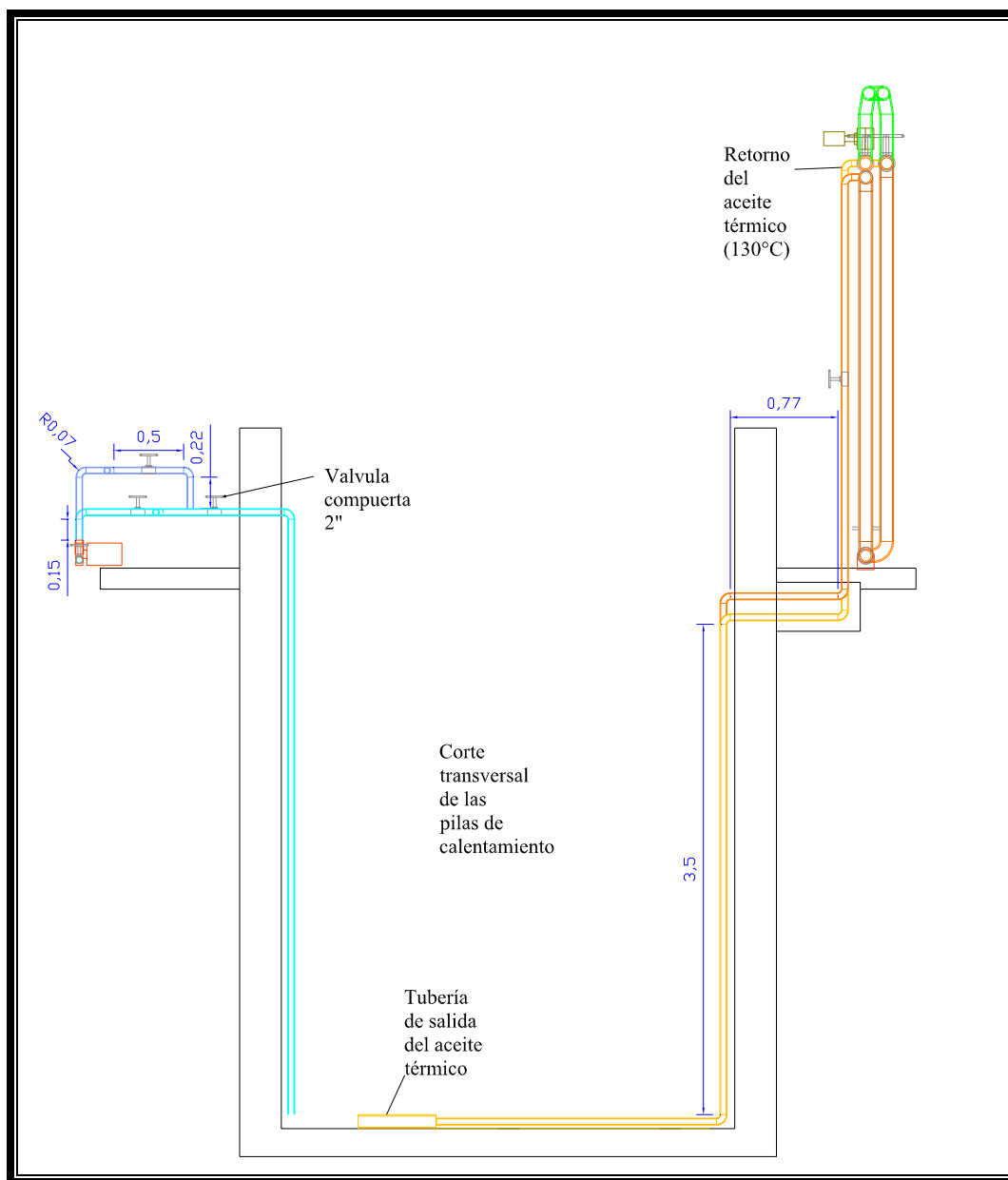
Anexo 12. Diagrama de la tubería para la extracción de agua de las pilas de calentamiento.



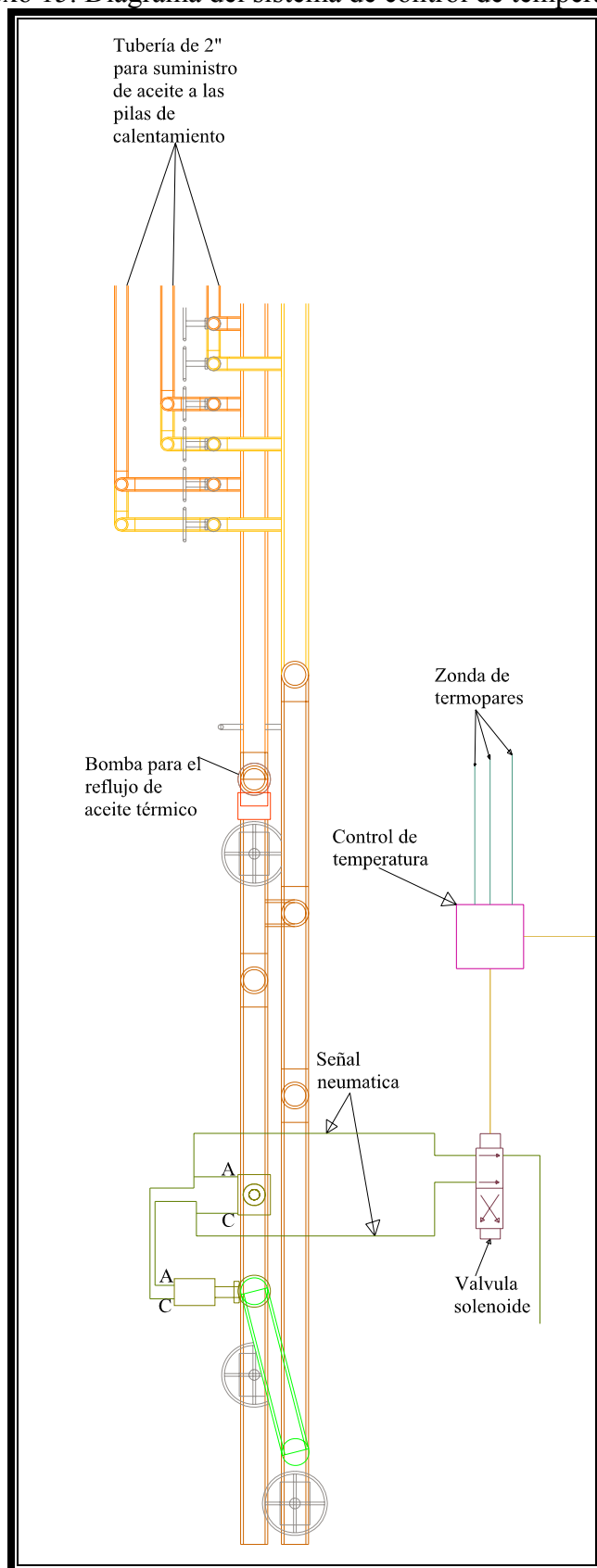
Anexo13. Corte B,B' dimensiones generales del flujo de aceite térmico y flujo de agua.



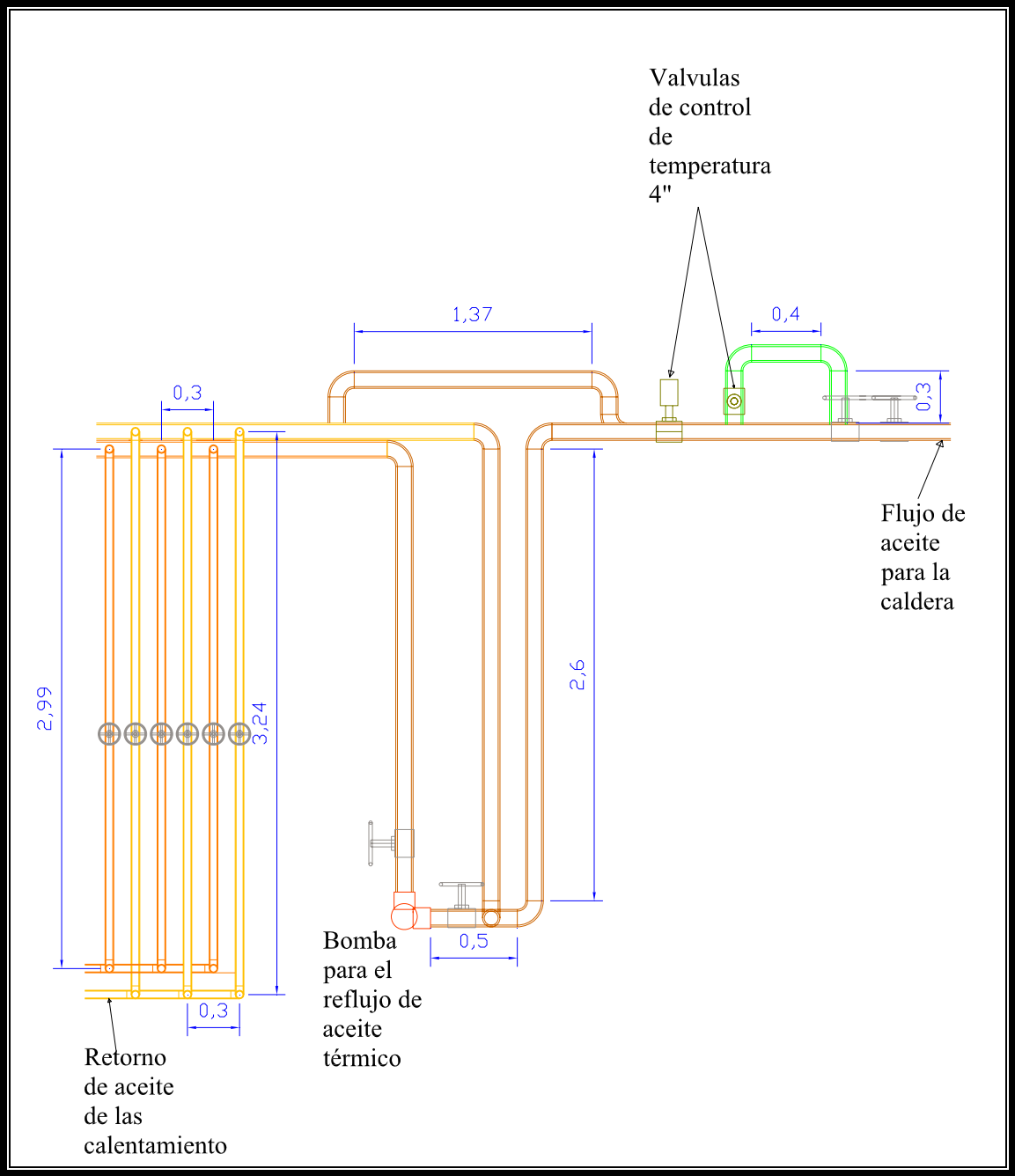
Anexo 14. Corte transversal de las pilas de calentamiento.



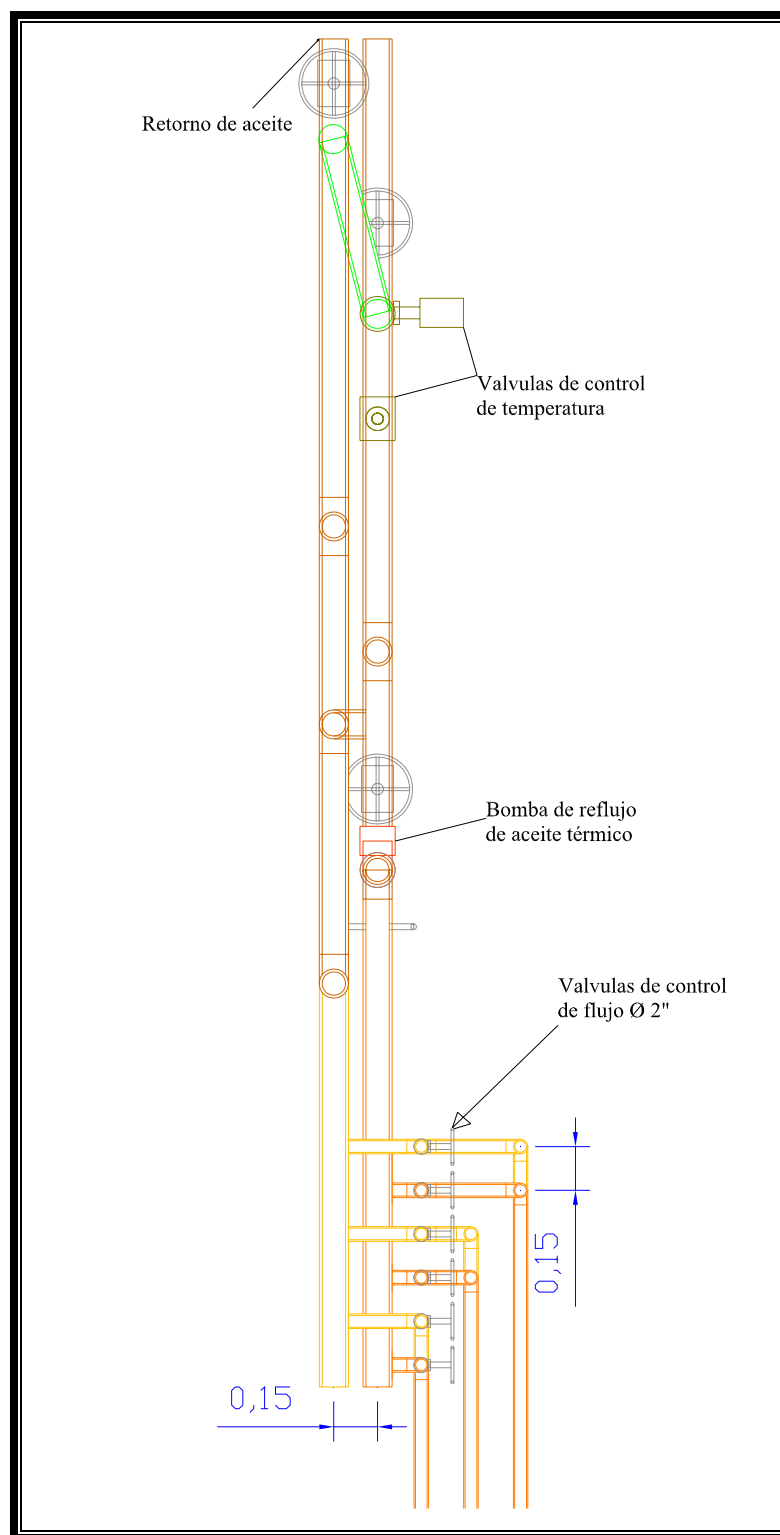
Anexo 15. Diagrama del sistema de control de temperatura.



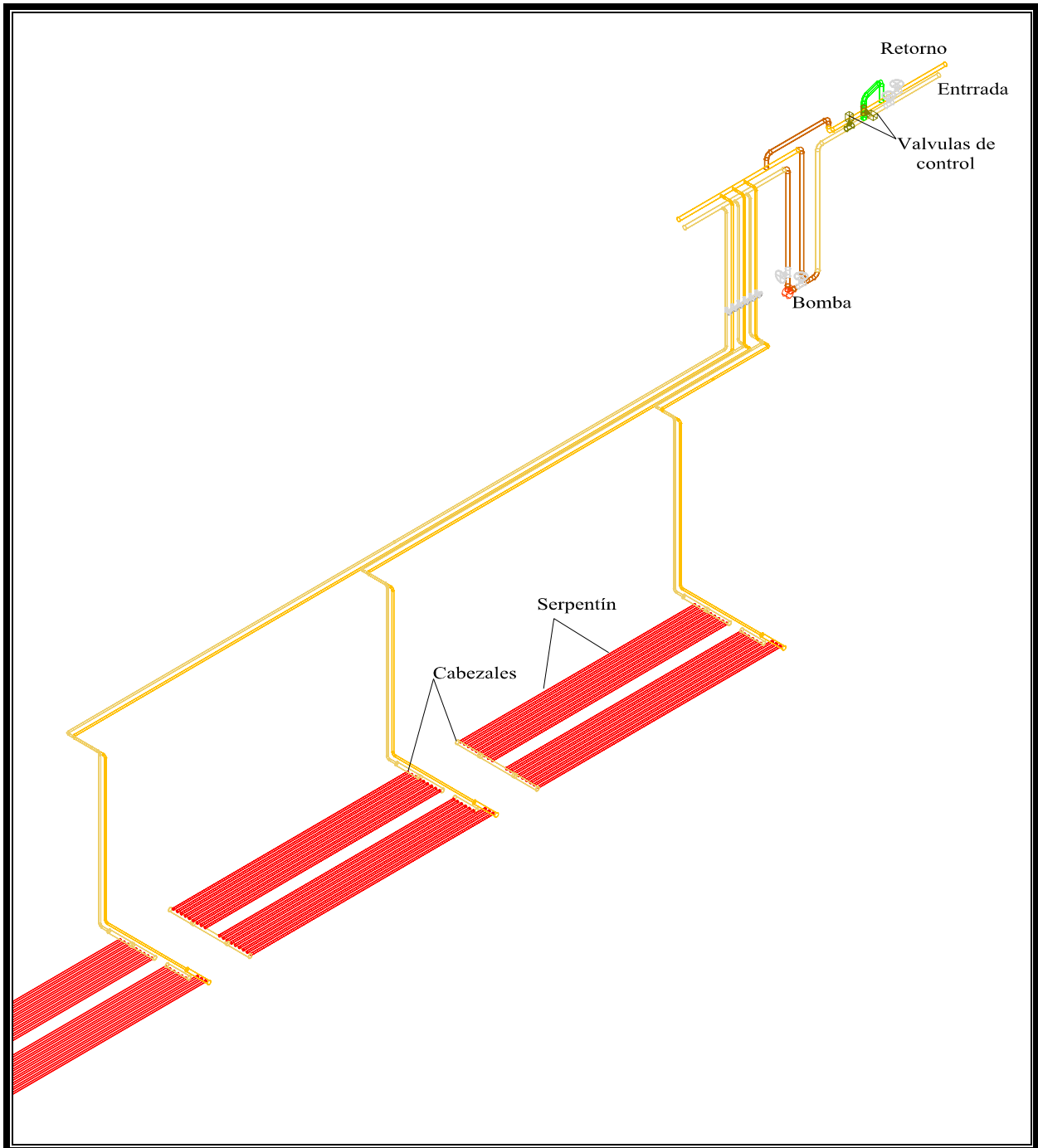
Anexo 16. Dimensiones del sistema de cabezales y sistema del reflujo de aceite térmico.



Anexo 17. Vista aérea del sistema de reflujo y cabezales.



Anexo 18. Vista 3D del refluo de aceite térmico y cabezales.



Anexo 19. Características técnicas del sistema de transporte de trocería.

Capacidad	5.0 ton
Izaje nominal	7.620 m
Monopuente	NEKO mod. GMPAP-ED con ruedas de 0.152 m
Servicio	Moderado CMAA clase C
Capacidad	5.0 ton
Claro	12.000 m
Izaje efectivo	7.620 m
Recorrido	30.000 m (se incluyen trabes carril con riel cuadrado)
Columnas	12 de 3.155 m de altura a cada 6.000 m
Velocidad de gancho	Doble de 1.00/6.09 m/min
Velocidad de carro	Doble de 5.09/15.24 m/min
Velocidad de puente	Variable de 0 a 23.08 m/min
Potencias	1 x 7.5 hp en gancho, 1 x 0.25 hp en carro, 2 x 0.75 en puente
Potencia total	9.25 hp con voltaje de operación a 460V-3-60
Control	Botonera suspendida del polipasto a 127V-1-60