



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROPUESTA DE MEJORAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COLADOS EN LA
PROCESADORA DE FRUTAS EZEQUIEL ZAMORA R.L.

Prof. Alberto Mieres Pitre
Tutor académico

Ing. José Vicente Ruiz
Tutor industrial

Autor:

Br. Francisco X. Castillo
C.I.: 17720130

Valencia, noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROPUESTA DE MEJORAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COLADOS EN LA
PROCESADORA DE FRUTAS EZEQUIEL ZAMORA R.L.

Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo para optar por el
título de Ingeniero Químico

Autor:

Br. Francisco X. Castillo

C.I.: 17720130

Valencia, noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el trabajo especial de grado titulado: "PROPUESTA DE MEJORAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COLADOS EN LA PROCESADORA DE FRUTAS EZEQUIEL ZAMORA R.L." realizado por el bachiller: Castillo V., Francisco X., C.I.: 17720130, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsable de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. Alberto Mieres Pitre

Presidente

Prof. Irina León

Jurado

Prof. Juan Bruce Acosta

Jurado

Valencia, noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el trabajo especial de grado titulado: “PROPUESTA DE MEJORAS AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COLADOS EN LA PROCESADORA DE FRUTAS EZEQUIEL ZAMORA R.L.” realizado por el bachiller: Castillo V., Francisco X., C.I.: 17720130, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsable de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. Alberto Mieres Pitre

Presidente

Prof. Irina León

Jurado

Prof. Juan Bruce Acosta

Jurado

Valencia, noviembre de 2010

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores José Vicente Ruiz y Alberto Mieres Pitre.

A los miembros del jurado.

A mi familia y amigos.

Y muy especialmente a la odontóloga María Alejandra Mejías Parra y al ingeniero Humberto Gil.

DEDICATORIA

A mis padres Guillermo Espinoza y Talía Vidal.

RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo principal la propuesta de mejoras al proceso de producción de colados en la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. con el fin de mejorar el rendimiento de la planta reduciendo las pérdidas de energía.

Para el cumplimiento de los objetivos, se procedió a la toma de datos y búsqueda de la información mediante la inspección del área y la identificación de los equipos involucrados en el proceso. También se mantuvieron conversaciones con todo el personal que labora día a día en la planta (operadores, supervisores, analistas de calidad, departamento de desarrollo y mantenimiento) con el fin de profundizar el conocimiento del proceso, compartir vivencias y experiencias sucedidas en el área, así como también definir las variables involucradas en el proceso. De esta manera, con la ayuda de un diagrama de causa-efecto y un diagrama de Pareto, se determinaron las principales causas que dan cabida a las pérdidas de energía que se dan en la línea de producción de colados, lo cual a su vez permitió el planteamiento de las alternativas adecuadas para la solución del problema.

Se plantearon las alternativas adecuadas para cada variable influyente, por medio de la bibliografía especializada y entrevistas con el personal calificado. Con las propuestas planteadas y criterios establecidos, se utilizó una matriz de selección para la escogencia de la opción que mejor se adapta a los requerimientos de la línea, para luego aplicar los indicadores económicos y poder calcular su rentabilidad.

Se propone la instalación de aislamiento térmico en marmitas y tuberías ya que las altas temperaturas a las que operan provocan una gran pérdida de energía al ambiente; además también se propone la desactivación del ciclo de refrigeración del túnel de enfriamiento debido a que su sobre diseño produce grandes pérdidas de energía eléctrica.

Palabras claves: pérdidas de energía, aislamiento térmico, sobre diseño.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases teóricas.....	10
CAPÍTULO III.....	31
3.1. Diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L. ...	32
3.2. Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.....	33
3.3. Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.	39
3.4. Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.....	43
3.5. Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas.....	44
CAPÍTULO IV.....	50
4.1 Diagnostico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L. ...	50
4.2 Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.....	55
4.3 Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.	64
4.4 Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.....	82
4.5 Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas que se usarán para la mejora del proceso de producción de colados.	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
APÉNDICE A Cálculos típicos.....	92
APÉNDICE B Programación de la información.....	111

APÉNDICE C Especificación de los equipos seleccionados	116
APÉNDICE D Tablas y figuras bibliográficas.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Soluciones unidimensionales de estado estable para la ecuación de calor sin generación interna.....	16
2.2	Coefficientes que se usan en la aproximación de un término para las soluciones de serie de la conducción transitoria unidimensional.....	27
2.3	Símbolos utilizados en las ecuaciones reportadas en el texto.....	30
4.1	Especificaciones de la capacidad de los equipos.....	54
4.2	Especificaciones de las tuberías y condiciones de operación.....	54
4.3	Condiciones de operación de los equipos y otras especificaciones.....	54
4.4	Guía de entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	55
4.5	Respuestas del operador de línea entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	56
4.6	Respuestas del supervisor de línea entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	56
4.7	Respuestas del analista de calidad entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	57
4.8	Matriz de causa – efecto para identificar las causas más significativas en el proceso que producen pérdidas de energía.....	63
4.9	Resultados del experimento para calcular la difusividad térmica del colado.....	70
4.10	Resultados de la experiencia para calcular la constante del calorímetro.....	72
4.11	Resultados de la experiencia para calcular el calor específico del colado.....	73
4.12	Temperatura a los 10 segundos del objeto de aluminio en el túnel de enfriamiento.....	75
4.13	Ponderación de los criterios a utilizar para construir la matriz de selección.....	84
4.14	Matriz de selección.....	85
B.1	Programación de los datos para la capacidad de los equipos.....	111
B.2	Programación de los datos para las tuberías y condiciones de operación.....	111
B.3	Programación de los datos para las condiciones de operación de los equipos y otras especificaciones.....	111
B.4	Guía de entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	112

B.5	Modelo de tablas de respuestas del personal a la entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.....	113
B.6	Modelo de matriz de causa – efecto para identificar las causas más significativas en el proceso.....	114
B.7	Modelo de la matriz de selección.....	115
C.1	Hoja de especificación de las cañuelas aislantes.....	116
C.2	Hoja de especificaciones de cemento aislante y de terminado ROCALÁN.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diagrama de bloques de la producción de colados en la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L.....	3
2.1	Transferencia unidimensional de calor por conducción (difusión de energía).....	12
2.2	Ejemplos de procesos de transferencia de calor por convección. (a) Convección forzada. (b) Convección natural.....	13
2.3	Resistencias térmicas para una pared compuesta.....	17
2.4	Distribución de temperaturas transitorias para diferentes números de Biot en una pared plana enfriada simétricamente mediante convección.....	23
2.5	Conducción transitoria bidimensional en un cilindro corto. (a) Geometría. (b) Forma de la solución por producto de soluciones.....	29
3.1	Diagrama de Ishikawa correspondiente al método 6 M's.....	35
3.2	Diagrama de Pareto para seleccionar las variables que más afectan la producción de jugos concentrados.....	38
3.3	Metodología usada para determinar la energía que se pierde por las tuberías y las marmitas.....	41
3.4	Metodología utilizada para determinar la temperatura de los frascos después de pasar por el túnel de enfriamiento.....	42
4.1	Distribución de la línea de producción de colados visto desde arriba en la Procesadora de Frutas Ezequiel Zamora R.L.....	51
4.2	Diagrama causa – efecto de las variables que influyen en las pérdidas de energía en la producción de colados.....	58
4.3	Diagrama causa – efecto depurado de las variables que influyen en las pérdidas de energía en la producción de colados.....	62
4.4	Diagrama de Pareto para causas que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.....	63
4.5	Tormenta de ideas de las alternativas propuestas para reducir las pérdidas de energía en el proceso de manufactura.....	65
4.6	Gráfico $\ln Y_{cf} = f(t)$ usado para el cálculo de la difusividad térmica del colado.....	69
4.7	Gráfica de $\ln(RT)$ vs. Tiempo del objeto de aluminio en el túnel de enfriamiento....	76

4.8	Pérdida de calor al ambiente en las tuberías de vapor vs. espesor del aislante de lana mineral.....	79
4.9	Pérdida de calor al ambiente en las tuberías de colado vs. espesor del aislante de lana mineral.....	79
4.10	Pérdida de calor al ambiente en las marmitas vs. espesor del aislante de lana mineral.....	80
4.11	Pérdida de calor al ambiente en el intercambiador de calor vs. Espesor del aislante de lana mineral.....	81
4.12	Tiempo de recuperación de la inversión inicial para llevar a cabo la propuesta de mejoramiento.....	89
A.1	Esquema del vaso Dewar usado para calcular el calor específico.....	98
D.1	Propiedades termofísicas de sólidos metálicos.....	118
D.2	Propiedades termofísicas de aislamiento industrial.....	120
D.3	Propiedades de gases a presión atmosférica.....	121
D.4	Propiedades termofísicas de agua saturada.....	122
D.5	Primeras cuatro raíces de la ecuación trascendental para conducción transitoria en una pared plana.....	124
D.6	Funciones de Bessel de primera clase.....	125
D.7	Distribución de temperatura en una pared plana de espesor $2L$	126
D.8	Temperatura del plano medio como función del tiempo para una pared plana de espesor $2L$	127
D.9	Distribución de temperaturas en un cilindro infinito de radio r_o	128
D.10	Temperaturas de la línea central como función del tiempo para un cilindro infinito de radio r_o	129
D.11	Distribución de temperaturas en una esfera de radio r_o	130
D.12	Temperatura de centro como función del tiempo en una esfera de radio r_o	131
D.13	Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías normalizadas de acero.....	132
D.14	Calores de combustión de algunos hidrocarburos.....	133
D.15	Propiedades del n-hexadecano.....	134
D.16	Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones.....	135

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad generar alternativas de mejoras en el proceso de fabricación de colados de frutas que disminuyan las pérdidas de energía, a fin de aumentar el rendimiento del proceso y disminuir el costo de producción del producto.

La importancia de la investigación radica en el aporte de ideas que disminuyan las pérdidas de energía. También cabe destacar, que además de lograr la disminución del costo de producción, se logrará que la manufactura del colado en esta procesadora de frutas sea más amigable con el medio ambiente. El consumo de energía y la contaminación ambiental están unidos; se podría reducir la contaminación ambiental si se aplicara la conocida máxima: «La energía que menos contamina es la que no se consume».

La investigación está estructurada en cuatro capítulos. En el primero de ellos, capítulo I, se expone la problemática que da origen a la investigación. Inicialmente se realiza una descripción y formulación del problema mediante el planteamiento de la situación actual, la situación deseada y el alcance; luego se presenta el objetivo general y los objetivos específicos y por último se expone la justificación y las limitaciones de la investigación.

En el capítulo II se presentan las bases referenciales que preceden la investigación y las definiciones teóricas que sustentan y contribuyen a la comprensión de la investigación. Seguidamente, en el capítulo III, se muestra el marco metodológico en el cual se explican el nivel y diseño de la investigación y se describen las actividades realizadas y las herramientas empleadas para el alcance exitoso de los objetivos planteados. Posteriormente, se exponen los resultados y discusiones de la investigación en el capítulo IV, reportándose principalmente las mejores propuestas para el proceso junto a las justificaciones de las mismas y el beneficio percibido por la empresa de implementarse la alternativa seleccionada; finalmente se mencionan las conclusiones y las recomendaciones aportadas a la empresa para el mejoramiento del proceso de manufactura.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se describe y se formula el problema en estudio, especificando la situación actual y deseada, estableciéndose así el objetivo general y los específicos para llevar a cabo la investigación. Seguidamente se presentan las razones que justifican y limitan el desarrollo de la misma.

1.1. Descripción del problema

La procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. establecida en San Carlos, estado Cojedes, comienza únicamente como procesadora de frutas, con el fin de entrar al mercado de pulpa; más adelante, la planta se expande y se comienza a producir jugos concentrados.

Hoy en día la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. busca diversificarse en el mercado, aprovechando la buena situación en que se encuentra, debido a la calidad excelente de sus productos. Con la producción de colados persigue consolidar el crecimiento sostenido de la empresa.

La línea de producción de colados está recientemente instalada en la empresa, en este proceso se mezcla pulpa de fruta, azúcar, agua, almidón y ácido como conservante en cantidades estipuladas por la empresa en función de sus parámetros de calidad.

La producción de colados comienza con el mezclado de las materias primas en un tanque con un agitador de alta velocidad destinado para tal fin (ver figura 1.1). Una vez que se encuentre bastante homogénea, es bombeada a dos tanques con agitación de baja velocidad en donde se calentará la mezcla para su cocción; el calor añadido activará el almidón dándole la viscosidad deseada. Luego de esta operación es bombeado a la envasadora para el llenado de pequeños recipientes de vidrio pasando antes por un calentador que opera con vapor para asegurar que el producto llegará a la envasadora a la temperatura deseada. A la salida de la envasadora los

recipientes se encuentran a una temperatura muy alta para su manipulación por lo que es necesario el uso de un túnel de enfriamiento para luego poder empaquetar el producto.

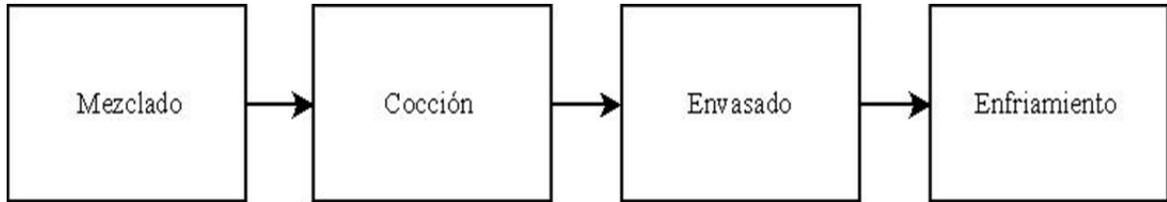


Figura. 1.1 Diagrama de bloques de la producción de colados en la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L.

El área de trabajo donde se realiza el mezclado, la cocción y el envasado es muy reducida y está aislada del resto de la planta para evitar cualquier tipo de contaminación en el producto. Debido a esto, la temperatura y la humedad de esa zona es muy alta y muy incómoda para los operadores de la línea, facilitando la posibilidad que ocurra algún accidente laboral, por lo que se requiere hacer un estudio del proceso para mejorar las condiciones de la línea.

En la etapa de enfriamiento el túnel que se encuentra instalado no ha sido objeto de estudio aún, por lo que no se sabe si opera a condiciones óptimas y podría estar perdiéndose energía de más en el proceso.

En tal sentido, esta investigación se centrará en reducir el gasto de energía del proceso para lograr con ello un efecto positivo en el costo total del nuevo producto.

1.2. Formulación del problema

La procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. en la producción de colados presenta problemas en la producción debido a pérdidas de energía térmica al ambiente, lo que conlleva a condiciones de trabajo no muy favorables para los operadores y también un problema de pérdida de energía en el enfriamiento posterior de los frascos de colados.

De acuerdo a lo mencionado surge la siguiente interrogante ¿es posible reducir el consumo energético del proceso?

1.2.1. Situación actual

El proceso de manufacturación de colados de la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. actualmente produce un alto agotamiento físico de los operadores debido a las altas temperaturas y alta humedad en el ambiente de trabajo debido a perdidas de energía en el proceso, lo que podría causar un accidente de trabajo; sumado a esto, el túnel de enfriamiento no trabaja a las mejores condiciones, lo que produce más pérdidas de energía en el proceso.

1.2.2. Situación deseada

Se busca reducir el consumo energético de la procesadora evitando perdidas de energía al ambiente de trabajo de la línea de producción de colados de la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. logrando con ello una mejora de la temperatura y la humedad a niveles más tolerables y disponer de un programa que simule la operación del túnel de enfriamiento para conocer las condiciones a las que debe estar sometido para lograr que trabaje lo mejor posible.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer mejoras del proceso de producción de colados de la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. para lograr reducir el gasto de energía en la producción.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L.

- Identificar los factores que influyen negativamente en el proceso de producción de colados.
- Proponer mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.
- Seleccionar la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.
- Determinar la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas que se usarán para la mejora del proceso de producción de colados.

1.4. Justificación

En estos últimos años, la manufacturación de productos derivados de frutas en Venezuela ha ido en crecimiento, estableciendo una gran competitividad en dicha área ya que actualmente coexisten un número considerado de pequeñas, medianas y grandes empresas que buscan abastecer la necesidad que se representa en el amplio mercado existente de estos productos.

Además, las leyes laborales venezolanas se han hecho más estrictas a favor de las condiciones en las que opera la mano de obra, convirtiendo la situación del ambiente de trabajo en un problema prioritario para la empresa. Por esta razón, este trabajo está orientado a reducir las pérdidas de energía, lo que tendrá como consecuencia la mejora del ambiente de trabajo de los operadores y del proceso de enfriamiento del producto final

Para la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L., resulta de gran importancia la búsqueda de progresos en sus líneas de producción debido a que eleva la calidad de sus productos y disminuye sus costos de operación logrando la satisfacción de los clientes, buscando con eso el propósito de consolidarse como una de las sobresalientes en el mercado.

Al mejorar el proceso de manufactura de las líneas de producción se estará afectando la eficiencia del uso de energía de combustible fósil, reduciendo su consumo, lo cual disminuye a su vez la emisión de gases de invernadero al ambiente el cual hoy en día es un problema mundial.

En el ámbito personal, este trabajo crea uno de los mayores retos en la carrera universitaria, ya que durante su elaboración se llevaron a cabo prácticas que permiten reforzar conocimientos, métodos y técnicas adquiridas en la universidad, así como adquirir habilidades al momento de realizar dichas actividades. Además, ofrece al autor una experiencia en el ámbito laboral e industrial, preparándolo de esta manera para futuros proyectos de gran importancia que se puedan presentar a lo largo del desarrollo de la carrera como Ingeniero Químico.

1.5. Limitaciones

En el presente trabajo de investigación la limitación fue la recolección de datos, ya que en la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L. no se cuenta con un sistema eficiente para la toma de datos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los trabajos de investigación que sirvieron de base para desarrollar el presente trabajo. Seguidamente se hace referencia a formulaciones o teorías de varios autores que abordan temas relacionados al trabajo de investigación, y que complementan y respaldan la presente investigación.

2.1. Antecedentes

2.1.1. MANZANO (2005) diseñó una estación de enfriamiento de piezas planas con unas dimensiones máximas de 300·250·25 milímetros. Este proyecto tuvo dos objetivos bien diferenciados pero ligados entre sí por el criterio beneficio de la empresa. En primer lugar, se trató de aumentar la calidad del proceso productivo reduciendo los tiempos de espera de las diferentes fases. En segundo lugar, se mejoró la seguridad del trabajo de los operarios, al reducir el riesgo de quemaduras al extraer piezas del molde en que se encuentra en el interior de una prensa a 120 °C. Partiendo de las especificaciones que ha de tener la máquina, se analizaron las alternativas para el diseño de los diferentes módulos funcionales por el método ordinal de criterios ponderados. A continuación se realizó el plan de tiempos y movimientos de la máquina para el posterior diseño de los órganos de traslación y rotación. Cabe destacar que el factor de diseño por excelencia para este proyecto, es la precisión de los movimientos, por lo que los principales elementos como los actuadores neumáticos, el servomotor (ligado a un reductor) y la mesa rotativa, vienen controlados por un PLC mediante señales de control. Con el fin de que en el momento de construir la máquina todo se lleve a cabo con la mayor facilidad, se proporciona una guía de montaje para los elementos más importantes; así como los elementos de seguridad necesarios para cumplir con las normativas correspondientes. El proyecto fue rentable, ya que la inversión por parte de la empresa fue de unos 63.200 euros por máquina, capital que se consiguió por la reducción total de piezas deformadas y por la reducción de mano de obra, ya que un solo trabajador puede controlar hasta ocho máquinas sin riesgo de lesiones. En conclusión, se

consiguió modernizar rentablemente una empresa que fabrica bandejas de comida, gracias a la incorporación de este proyecto en su proceso productivo, haciéndola más efectiva y segura.

2.1.2. DUSSÁN-SARRIA y HONÓRIO (2005) estudiaron los parámetros de enfriamiento rápido con aire forzado, de higos embalados en cajas de cartón tipo exportación. Las frutas fueron cosechadas en el estadio rami (3/4 de maduración) y tamaño 8 (ocho frutos por caja), sumando un total de 24 frutas por empaque. El paquete de cartón se refiere a una caja con tapa con las siguientes dimensiones externas: longitud 37 cm, ancho 27 cm y altura 7,5 cm y el área de abertura de 10,6 cm². Se utilizaron 48 embalajes, 24 en cada lado para formar el túnel californiano. El flujo de aire fue de 2,8 L s⁻¹ kg⁻¹ de producto, con una velocidad promedio del aire de 5,2 m s⁻¹. La temperatura inicial de los frutos fue de 19°C y la temperatura final de 1°C. La temperatura interna de los frutos fue medida con termopares tipo T (24AWG) y la evaluación de la temperatura se registró a través de un sistema de adquisición de datos AQDADOS de Linux. Se determinó la curva de enfriamiento y un modelo analítico exponencial para predecir el tiempo de enfriamiento. El tiempo de enfriamiento rápido fue de 100 minutos, el coeficiente de enfriamiento 0,0331 min⁻¹, el número de Biot 1,2 y el coeficiente convectivo de transferencia de calor 22,6 W m⁻² °C.

2.1.3. TERUEL y colaboradores (2005) desarrollaron una herramienta computacional para simulación de procesos de enfriamiento utilizando balances de masa y energía tanto del aire que se usa para refrigerar como de los productos a enfriar, considerando que no existe intercambio de masa, ya que el enfriamiento es rápido. Luego de establecer las condiciones iniciales y de contorno se procedió a la solución numérica y la validación experimental de los resultados de la investigación. El programa computacional realizado arrojó resultados que se desvían de la experiencia en un 5% para la temperatura final del aire y del producto.

2.1.4. OJEDA (2002) evaluó experimentalmente la variación de temperatura de un cuerpo que se enfría hasta alcanzar la temperatura del medio circundante. Analizó los resultados usando métodos gráficos, en el marco de la ley de enfriamiento de Newton. Para realizar la experiencia utilizó un termómetro de bulbo con escala entre -10 °C a 150 °C. Sumergió el termómetro en agua caliente hasta que su temperatura alcanzó la máxima posible; anotó esta temperatura inicial T_i .

Retiró el termómetro del agua y lo dejó enfriar hasta que alcanzó la temperatura del medio tomando registro de la temperatura en función del tiempo. Mediante la experimentación concluyó que la ley de enfriamiento de Newton da cuenta del enfriamiento de este cuerpo en las condiciones del experimento (enfriamiento por convección en aire).

2.1.5. MONTEAGUDO y colaboradores (1998) estudiaron la problemática de mantener un nivel de temperatura específico y, por tanto, de viscosidad para garantizar un bombeo adecuado del petróleo crudo y en especial, luego de las paradas de las instalaciones. Para ello se utilizó un aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor, que consiste en suministrar un calentamiento adicional con la ayuda de una tubería acompañante de vapor dispuesta a lo largo de toda la tubería y forradas ambas con el material aislante, de manera tal que se forme una cavidad termo-aislada. Para la deducción de la metodología de cálculo, se parte de un balance de energía, el cual considera que el calor proveniente de la tubería acompañante de vapor se gasta en el calentamiento de la tubería principal y en el intercambio térmico con el medio exterior. Al final se concluyó lo siguiente:

- El método de aislamiento térmico de las tuberías destinadas al transporte de petróleo crudo con tuberías de vapor acompañantes o tracer de vapor permiten mejorar las condiciones de trasiego, y alivia las dificultades que se presentan en los momentos posteriores a las paradas de las instalaciones.
- La metodología expuesta permite calcular el espesor del aislamiento térmico y su validez está confirmada, tanto por la literatura consultada, como por la aplicación y comprobación del espesor de aislamiento en las instalaciones proyectadas y ejecutadas en Cuba por firmas extranjeras, pudiendo ser útiles a aquellos encargados de ejecutar tareas similares relacionadas con la problemática de la utilización del crudo cubano.
- El espesor calculado del aislante es de 56 mm, el cual coincide con el usado en tuberías de tamaño semejante destinadas al trasiego de fuelóleo por la empresa alemana constructora de la fábrica.
- La aplicación práctica del resultado aquí expuesto y su funcionamiento satisfactorio en la empresa de cemento “Karl Marx” de Cienfuegos hacen fiable la metodología de cálculo y constituye un instrumento útil de trabajo.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Transmisión de calor

La transmisión de calor es un proceso dinámico durante el cual se transmite energía térmica desde una materia caliente a otra más fría. Su velocidad depende de la diferencia de temperatura existente entre ellas y es mayor cuanto más grande sea ésta.

La fuerza motriz que impulsa la transmisión de calor es el gradiente de temperaturas entre la fuente y el receptor. Un aumento en la diferencia de temperatura hace que aumente la fuerza motriz, y por lo tanto la velocidad de transmisión de calor. Este pasa de una sustancia a otra atravesando un medio, que en general ofrece cierta resistencia al flujo de calor. Estos dos factores afectan la velocidad de transmisión de energía térmica. A semejanza de otros procesos que se realizan a una cierta velocidad, estos factores están relacionados entre sí por la ecuación general:

$$\text{Velocidad de transmisión} = \frac{\text{fuerza motriz}}{\text{resistencia}} \quad 2.1$$

Que para la transmisión de calor tiene la forma de:

$$\text{Velocidad de transmisión de calor} = \frac{\text{diferencia de temperatura}}{\text{resistencia del medio al flujo de calor}} \quad 2.2$$

El calor se puede transmitir de tres maneras diferentes: por conducción, por convección y por radiación. En la conducción se intercambia directamente energía molecular desde la sustancia más caliente a la más fría, cediendo las moléculas de mayor energía parte de ella a las moléculas vecinas de menor energía. La transmisión de calor por radiación consiste en la transmisión de energía térmica por medio de ondas electromagnéticas, que transmiten calor de un cuerpo a otro de la misma forma que las ondas electromagnéticas de la luz transmiten energía luminosa. En la convección, la transmisión de calor se lleva a cabo por el movimiento de grupos de moléculas de un fluido; los grupos de moléculas pueden moverse debido a cambios de densidad o por un movimiento forzado del fluido.

En general, en los sólidos el calor se transmite por conducción y en los fluidos por conducción y convección. La transmisión de calor por radiación tiene lugar en espacios abiertos, de la misma forma que sucede con la transmisión de la luz.

Durante estos procesos la temperatura puede cambiar, dando lugar por tanto a un cambio en la velocidad de transmisión de calor; esta situación se denomina transmisión de calor en estado no estacionario o en estado transitorio. (Earle, 1998)

2.2.2. Conducción

Es posible cuantificar el intercambio térmico en término de las ecuaciones o modelos apropiados. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como la *primera ley de Fourier*. Para la pared plana unidimensional que se muestra en la figura 2.1 la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad 2.3$$

El *flujo de calor* o *transferencia de calor por unidad de área* q es la velocidad con que se transfiere la energía térmica en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dx}$ en esta dirección. k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente. En las condiciones de estado estable que se muestran en la Figura 2.1, donde la distribución de temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad 2.4$$

Y el flujo de calor es:

$$q = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad 2.5$$

O:

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad 2.6$$

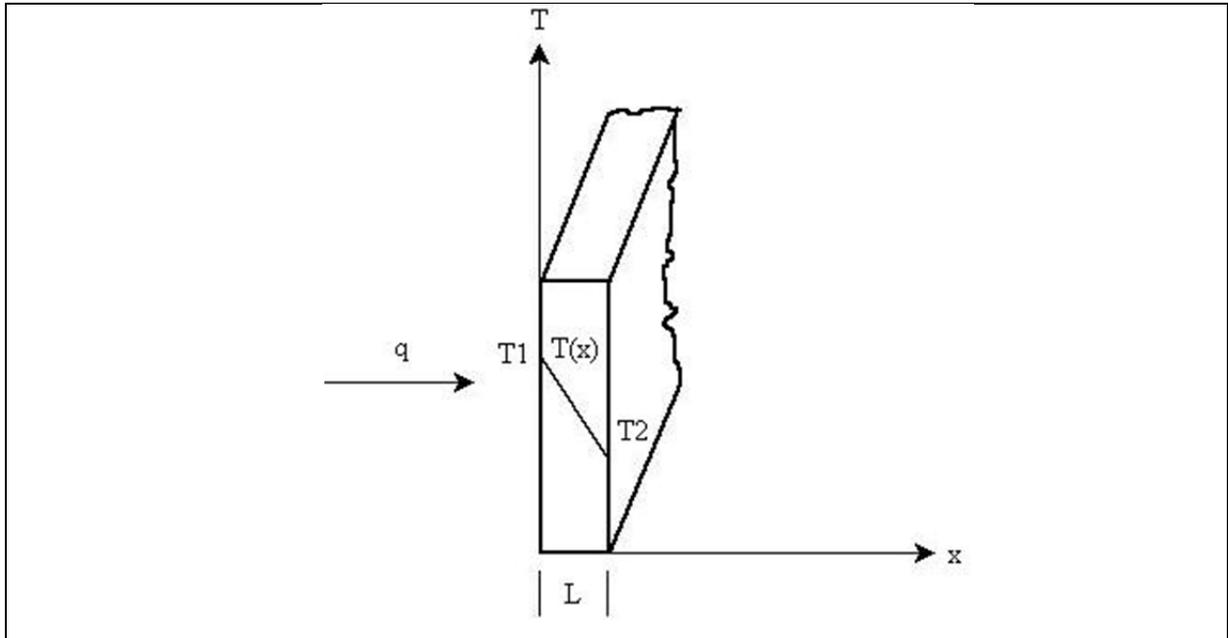


Figura. 2.1 Transferencia unidimensional de calor por conducción (difusión de energía). (Incropera y DeWitt, 1999)

2.2.3. Convección

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección (ver figura 2.2), la ecuación o modelo apropiado es de la forma:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad 2.7$$

Donde q , el flujo de calor por convección, es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la *ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad h se denomina *coeficiente de transferencia de calor por convección*. Este depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y

una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte. (Incropera y DeWitt, 1999)

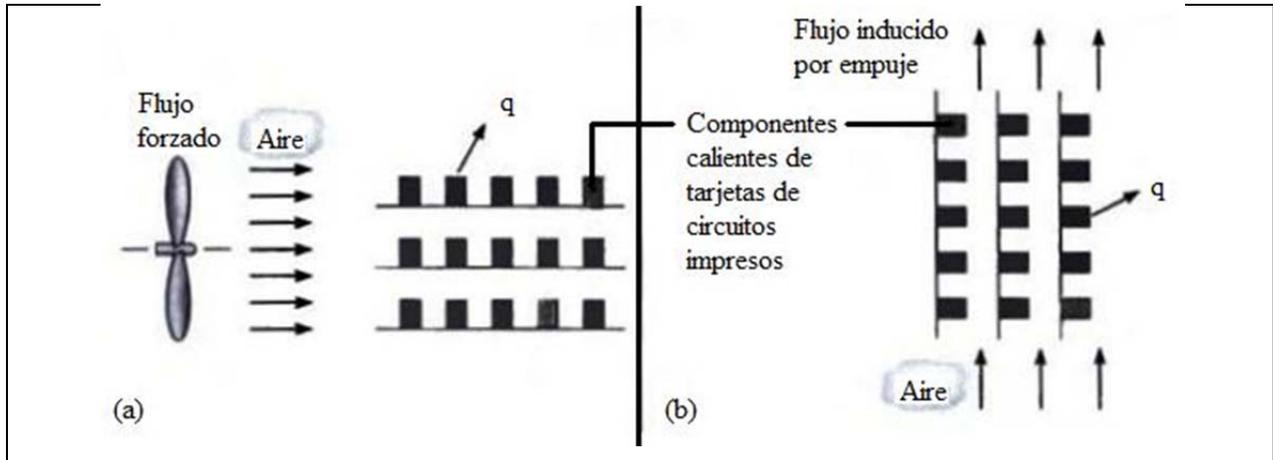


Figura. 2.2 Ejemplos de procesos de transferencia de calor por convección. (a) Convección forzada. (b) Convección natural. (Incropera y DeWitt, 1999)

2.2.4. Convección natural

Cuando un fluido está en contacto con una superficie a diferente temperatura, tiene lugar la transmisión de calor por convección natural; a medida que el fluido se calienta o se enfría, su densidad varía; esta diferencia de densidades hace que el fluido que se ha calentado o enfriado se mueva, con lo que la transmisión de calor continúa.

Se ha observado que el intercambio térmico por convección natural depende de las propiedades físicas del fluido, densidad ρ , viscosidad μ , conductividad térmica k , capacidad calorífica a presión constante C_p y coeficiente de dilatación térmica β , que para los gases ideales es igual a $\frac{1}{T}$ con T en K, según la *ley de Charles*. Otros factores que también influyen son alguna dimensión lineal del sistema, diámetro o longitud, la diferencia de temperaturas y naturalmente la aceleración de gravedad, por ser las diferencias de densidad movidas por la gravedad las que producen la circulación. Las velocidades de transmisión de calor se expresan en función de un coeficiente de transmisión de calor por convección h . (Earle, 1998)

Se ha encontrado experimentalmente que la transmisión de calor por convección se puede describir por medio de la combinación de todos estos factores mediante grupos adimensionales conocidos por los nombres de investigadores distinguidos en este campo:

- Número de Nusselt (Nu)

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad 2.8$$

- Número de Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{c_P \mu}{k} \quad 2.9$$

- Número de Grashof (Gr)

$$Gr = \frac{D^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad 2.10$$

Complementados en algunos casos por la relación de longitudes $\left(\frac{L}{D}\right)$.

Si estos grupos adimensionales se pueden relacionar por medio de una sencilla función exponencial, entonces la ecuación más general de la convección natural se puede escribir como:

$$Nu = K Pr^l Gr^m \left(\frac{L}{D}\right)^n \quad 2.11$$

Se han evaluado experimentalmente los valores de K , l , m y n , en distintas condiciones de operación. El número de Nusselt se puede calcular una vez se conozcan K , l , m y n , para el caso particular que se trate, así como las apropiadas características físicas del fluido. Con el número de Nusselt se puede determinar h y por lo tanto, se puede conocer la velocidad de transmisión de calor por convección. En las ecuaciones de convección natural los valores de las constantes

físicas del fluido se toman a la temperatura media existente entre la superficie y la masa del fluido. (Earle, 1998)

Para *convección natural en cilindros verticales*, Earle (1998), recomienda:

$$Nu = 0,55(PrGr)^{0,25} \quad \text{para } 10^4 < (PrGr) < 10^9 \quad 2.12$$

$$Nu = 0,13(PrGr)^{0,33} \quad \text{para } 10^9 < (PrGr) < 10^{12} \quad 2.13$$

Estas ecuaciones se simplifican para el aire con $L > 1 \text{ m}$ (Earle, 1998), quedando como:

$$h = 1,3 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} \quad \text{para } 10^4 < (PrGr) < 10^9 \quad 2.14$$

$$h = 1,8(\Delta T)^{0,33} \quad \text{para } 10^9 < (PrGr) < 10^{12} \quad 2.15$$

Estas dos últimas ecuaciones son dimensionales y válidas sólo para unidades estándar (ΔT en $^{\circ}\text{C}$, L ó D en metros y h en $\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). La dimensión característica a utilizar en el cálculo del número de Nusselt y del número de Grashof con estas ecuaciones es la altura del cilindro.

Para *convección natural en esferas y cilindros horizontales* con $D < 0,2 \text{ m}$; Earle (1998), utiliza:

$$h = 1,31 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25} \quad \text{para } 10^3 < (PrGr) < 10^9 \quad 2.16$$

$$h = 1,8(\Delta T)^{0,33} \quad \text{para } 10^9 < (PrGr) < 10^{12} \quad 2.17$$

2.2.5. Resistencia térmica

Existe una analogía entre la difusión de calor y la corriente eléctrica. De la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor. Al definir resistencia como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente. La resistencia térmica para la conducción en una pared plana es:

$$R = \frac{T_{S1} - T_{S2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad 2.18$$

En la tabla 2.1 se muestran las ecuaciones de flujo de calor, transferencia de calor y resistencia térmica para paredes planas, cilíndricas y esféricas.

Tabla 2.1 Soluciones unidimensionales de estado estable para la ecuación de calor sin generación interna.

	Pared plana	Pared cilíndrica ^a	Pared esférica ^a
Flujo de calor (qⁿ)	$k \frac{\Delta T}{L}$	$\frac{k\Delta T}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	$\frac{k\Delta T}{r^2 \left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)\right]}$
Transferencia de calor (q)	$kA \frac{\Delta T}{L}$	$\frac{2\pi L k \Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	$\frac{4\pi k \Delta T}{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)\right]}$
Resistencia térmica (R)	$\frac{L}{kA}$	$\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k}$	$\frac{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)\right]}{4\pi k}$

^a El radio crítico de aislamiento es $r_{cr} = \frac{k}{h}$ para el cilindro y $r_{cr} = \frac{2k}{h}$ para la esfera. **(Incropera y DeWitt, 1999)**

También se puede asociar una resistencia térmica con la convección:

$$q = hA(T_S - T_\infty) \quad 2.19$$

La resistencia térmica para convección es entonces:

$$R = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad 2.20$$

(Incropera y DeWitt, 1999)

2.2.6. Resistencias térmicas en serie

La analogía eléctrica puede usarse para resolver problemas más complejos que involucran las resistencias térmicas en serie y en paralelo. En la figura 2.3 se muestra un problema típico. La ecuación de flujo unidimensional de energía para este tipo de problemas puede escribirse como:

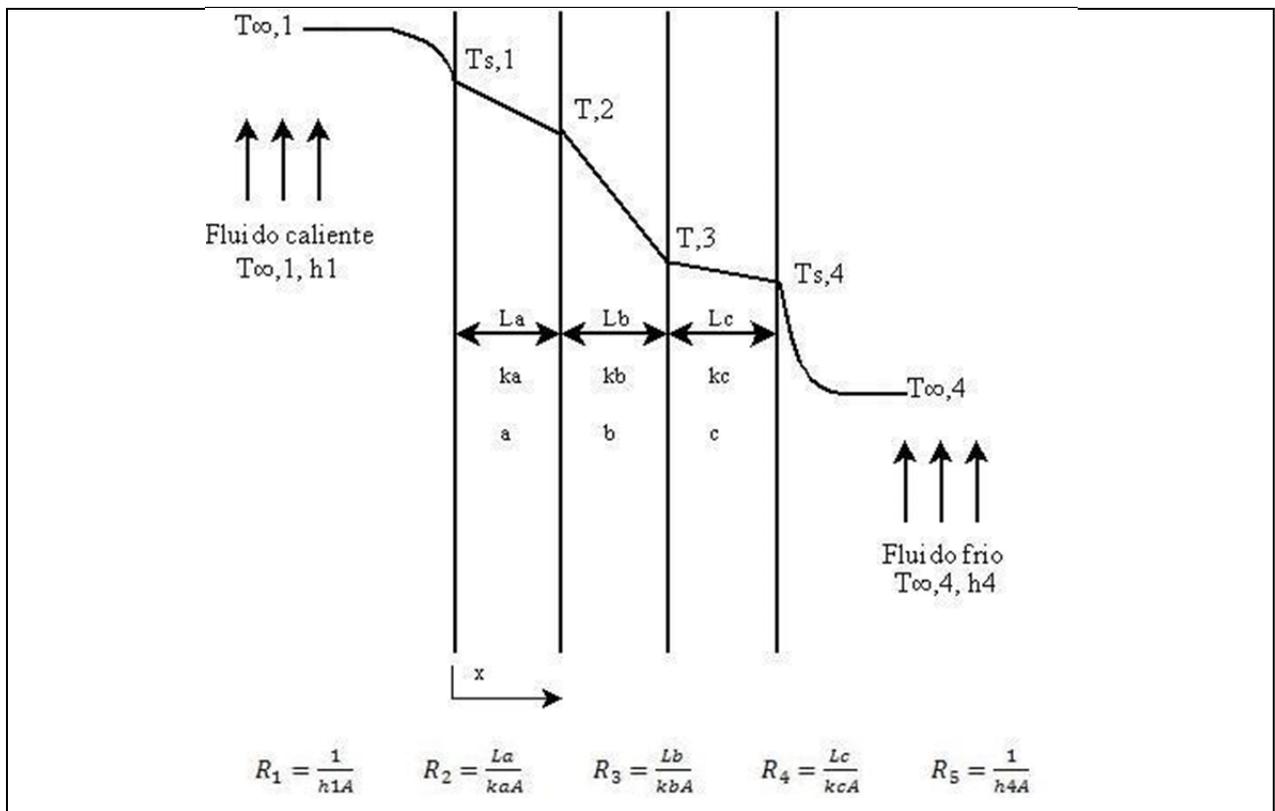


Figura. 2.3 Resistencias térmicas para una pared compuesta. (Levenspiel, 1993)

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_i} \quad 2.21$$

(Holman, 1999)

2.2.7. El aislamiento en la industria

El aislamiento térmico se utiliza en la industria desde el inicio de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX.

Las razones para utilizar aislamiento térmico son, fundamentalmente:

- Necesidades de proceso, ya que deben evitarse transferencias térmicas que disfuncionen el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
- Seguridad de las personas y bienes. Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
- El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento. Es con mucho el mejor método de ahorro de energía conocido, permitiendo la amortización del material aislante instalado en periodos de tiempo muy bajos.
- La reducción de la contaminación ambiental. La mayor parte de la energía que se utiliza en los procesos térmicos procede de la transformación de un combustible por reacción exotérmica del mismo con el oxígeno ambiental. La composición química de los combustibles, debido a su origen orgánico, es mayoritaria en carbono, con porcentajes variables de hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno entre otros. Por ello, el contaminante atmosférico más abundante que se produce es el dióxido de carbono. En menores proporciones, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

- Dióxido de carbono y el efecto invernadero. El dióxido de carbono es un gas incoloro e incombustible, representando el más alto porcentaje de efluyentes atmosféricos en los procesos de combustión.

El volumen estimado de CO₂ que se arroja a la atmosfera en todo el planeta se evalúa en 20 mil millones de toneladas/año.

Una de las particularidades de este gas es que deja pasar a través de él radiaciones de baja longitud de onda del espectro solar. Sin embargo, es capaz de absorber buena parte de la energía calorífica de la irradiación de la Tierra, cuyas longitudes de onda son más altas. De este modo, se forma una capa casi impermeable de la evacuación del calor terrestre, provocando un aumento de la temperatura del planeta.

Este hecho es conocido como efecto invernadero.

El nivel de emisiones de CO₂, a la atmosfera ha aumentado de un modo alarmante en la era industrial. Desde 1900 a 1985, la proporción de CO₂ en la atmosfera ha pasado de 290 a 348 ppm. Hacia el 2030~2050, se espera que el valor alcanzado sea el doble que a principios del siglo XX.

Los científicos estiman que lo anterior supondrá un aumento de la temperatura media global del planeta de 1,5 a 4,5 °C; cuyas consecuencias se prevén dramáticas.

Por otra parte, no sólo se está incrementando el nivel de CO₂, sino que además se contribuye a agravar el problema por otras causas. Entre ellas, que las masas forestales, capaces de transformar el CO₂ en O₂ mediante la función clorofílica, están en recesión o en vías de desaparición en muchas regiones del planeta.

- SO₂ y la lluvia ácida. El dióxido de azufre emitido a la atmósfera por las combustiones de algunas fuentes energéticas primarias (carbón, petróleo), es mucho menor en cantidad que el CO₂, pero sus valores anuales globales son importantes y sus consecuencias también muy graves.

Además, el SO₂ es un gas indeseable desde el punto de vista sanitario. En el mundo, millones de personas deben soportar problemas respiratorios a causa del SO₂.

Por otra parte, el SO_2 producido se difunde por la atmósfera y es arrastrado por los vientos. Mediante la humedad y la lluvia, se transforma sucesivamente en SO_3H y SO_4H_2 diluidos, capaces de atacar los materiales con los que entre en contacto.

Constituye la llamada lluvia ácida. Uno de los aspectos más importantes de este fenómeno son las consecuencias de la lluvia ácida sobre las masas forestales y los cultivos. Las composiciones alcalinas de los terrenos desaparecen por el ataque, y los árboles enferman y mueren. Buena parte de los bosques de Europa central y del norte, así como de EE.UU y otras regiones cercanas a centros industriales están en recesión por esta causa.

- Aislamiento térmico para reducir la contaminación ambiental. Dado que consumo de energía y contaminación ambiental están unidos, se podría reducir la contaminación si se aplicara la conocida máxima: la energía que menos contamina es la que no se consume.

Sin embargo, no parece posible una reducción drástica e indiscriminada del consumo energético, ya que esto afectaría gravemente a la economía y a la calidad de vida, especialmente en los países industrializados.

Si parece posible y exigible buscar un compromiso aceptable entre consumo de energía primaria y el rendimiento útil obtenido en los procesos térmicos alcanzando el posible para un uso racional de energía.

No se trata por tanto de no consumir energía, sino de consumirla mejor, mediante la adopción de técnicas que permitan gastar menos para el mismo fin.

Lo anterior supone un análisis muy preciso de todas las secuencias de los procesos, desde el punto de vista energético.

Todos los casos de procesos térmicos en espacios cerrados preconizan, como solución fundamental para reducir el consumo, la adopción de sistemas de aislamiento térmico, estudiados adecuadamente en calidad y espesor.

2.2.8. Intercambio térmico transitorio

Este tipo de transferencia surge cuando cambian las condiciones de frontera de un sistema. Por ejemplo, si se altera la temperatura superficial de un sistema, la temperatura en cada punto del sistema comenzará a cambiar. Los cambios continuaran ocurriendo, hasta que se alcance una distribución de temperaturas de estado estable. (Incropera y DeWitt, 1999)

En el proceso de calentamiento o enfriamiento transitorio que tiene lugar en el periodo intermedio antes que establezca el equilibrio, el análisis debe modificarse para tomar en cuenta el cambio de la energía interna del cuerpo con el tiempo, y se deben ajustar las condiciones de frontera para que correspondan a la situación física que aparece en el problema de transferencia de calor en estado transitorio. El análisis de transferencia de calor en estado transitorio es de gran interés práctico, debido al gran número de procesos de calentamiento y enfriamiento que deben calcularse en aplicaciones industriales. (Holman, 1999)

2.2.9. Método de la resistencia interna despreciable

La esencia del método de resistencia interna despreciable es suponer que la temperatura del sólido es *uniforme* en cualquier instante durante el proceso transitorio.

Esta condición implica la existencia de una conductividad térmica infinita lo cual es claramente imposible. Sin embargo, se acerca mucho a ello si la resistencia conductiva dentro del sólido es pequeña comparada con la resistencia convectiva entre el sólido y sus alrededores.

La respuesta de temperatura transitoria se determina realizando un balance global de energía en el sólido que toma la forma:

$$-hA_S(T - T_\infty) = \rho V C_P \frac{dT}{dt} \quad 2.22$$

Al introducir las diferencia de temperaturas:

$$\theta \equiv T - T_{\infty} \quad 2.23$$

Y aceptar que $\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \left(\frac{dT}{dt}\right)$, se sigue que:

$$\frac{\rho V C_P}{h A_S} \frac{d\theta}{dt} = -\theta \quad 2.24$$

Separando variables e integrando desde la condición inicial, para que $t=0$ y $T_{(0)}=T_i$, obtenemos entonces:

$$\frac{\rho V C_P}{h A_S} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad 2.25$$

O:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp \left[- \left(\frac{h A_S}{\rho V C_P} \right) t \right] \quad 2.26$$

Donde:

$$\frac{h A_S t}{\rho V C_P} = Bi * Fo \quad 2.27$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_C^2} \quad 2.28$$

$$Bi = \frac{h L_C}{k} \quad 2.29$$

(Incropera y DeWitt, 1999)

La ecuación 2.25 sirve para determinar el tiempo que requiere el sólido para alcanzar alguna temperatura T ó, a la inversa, la ecuación 2.26 es útil para calcular la temperatura que alcanza el sólido en algún tiempo t . Al sustituir 2.27 en 2.26 se obtiene:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty} = \exp[-Bi * Fo] \quad 2.30$$

Este método sólo es válido para:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0,1 \quad 2.31$$

Siendo L_c la mitad del espesor para el caso de una pared plana. (Incropera y DeWitt, 1999)

En la figura 2.4 se muestran los diferentes perfiles de temperatura en estado transitorio para diferentes números de Biot.

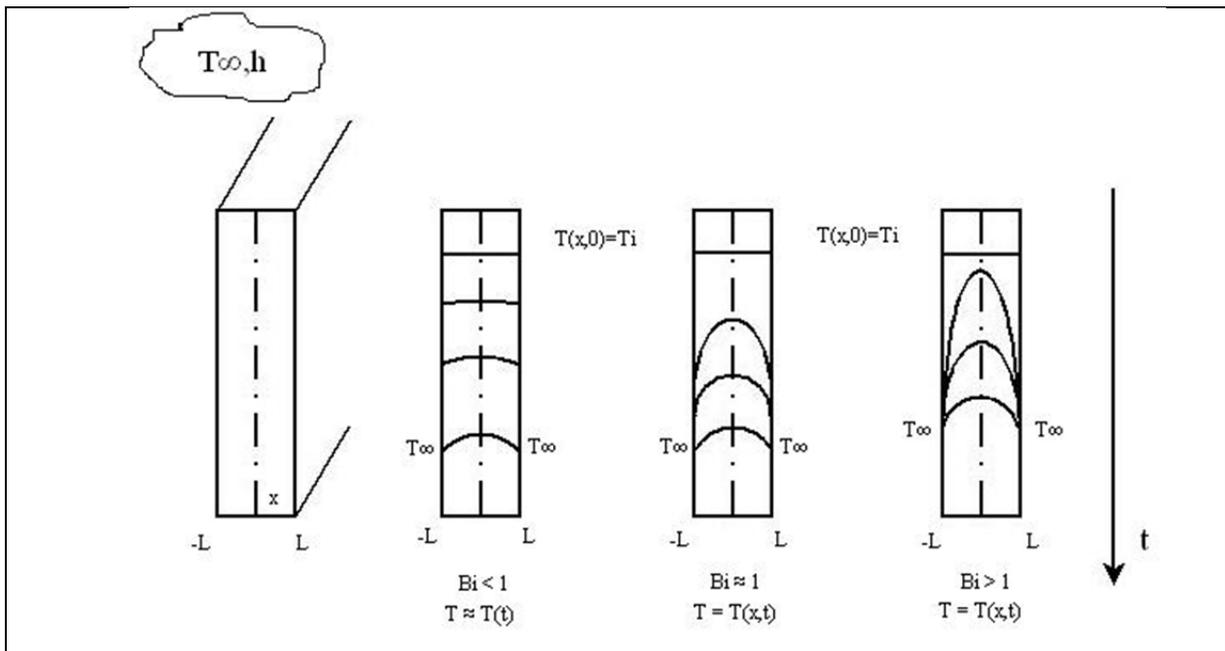


Figura 2.4 Distribución de temperaturas para diferentes números de Biot en una pared plana enfriada simétricamente mediante convección. (Levenspiel, 1993)

2.2.10. Efectos espaciales

Cuando la resistencia interna no es despreciable, los gradientes internos dentro del medio ya son significantes (Holman, 1999). Para el caso de conductividad térmica constante sin generación interna, se tiene que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.32$$

Para resolver esta ecuación en cuanto a la distribución de temperaturas $T(x,t)$, es necesario especificar una condición *inicial* y dos *condiciones de frontera*. La condición inicial es:

$$T_{(x,0)} = T_i \quad 2.33$$

Y las condiciones de frontera son:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad 2.34$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h[T(L,t) - T_\infty] \quad 2.35$$

La condición inicial presupone una distribución uniforme de temperaturas en $t=0$ y las condiciones de frontera son el *requerimiento de simetría* para el plano medio de la pared y la condición de superficie experimentado en $t > 0$. Se hace evidente a partir de las ecuaciones que T depende de un número de parámetros físicos. En particular:

$$T = f(x, t, T_i, T_\infty, L, k, \alpha, h) \quad 2.36$$

Es importante notar las ventajas que se obtienen de adimensionar las ecuaciones determinantes. Esto se logra reacomodando las variables relevantes en *grupos* adecuados. Por ejemplo, la variable dependiente T , si la diferencia de temperaturas se divide entre la diferencia de temperaturas máxima posible, se puede definir una forma adimensional de la variable dependiente como:

$$\theta^* \equiv \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad 2.37$$

En consecuencia, θ^* debe estar en el rango $0 \leq \theta \leq 1$. Una coordenada espacial adimensional se define como:

$$x^* \equiv \frac{x}{L} \quad 2.38$$

Donde L es la mitad del espesor de la pared plana, y un tiempo adimensional se define como:

$$t^* \equiv \frac{\alpha t}{L^2} \equiv Fo \quad 2.39$$

Donde t^* es el equivalente al *número de Fourier*. (Incropera y DeWitt, 1999)

Sustituyendo estas definiciones, la ecuación de calor se convierte en:

$$\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} \quad 2.40$$

Y las condiciones inicial y de frontera son:

$$\theta^*(x^*, 0) = 1 \quad 2.41$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=0} = 0 \quad 2.42$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=1} = -Bi\theta^*(1, t^*) \quad 2.43$$

Ahora la dependencia funcional se expresa como:

$$\theta^* = f(x^*, Fo, Bi) \quad 2.44$$

2.2.11. Pared plana con convección

Para valores de $Fo > 0,2$; la solución aproximada es:

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \cos(\zeta_1 x^*) = \theta_0^* \cos(\zeta_1 x^*) \quad 2.45$$

Donde $\theta_0^* \equiv \frac{(T_0 - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)}$ representa la temperatura del plano medio $x^* = 0$

$$\theta_0^* = \frac{\theta_0}{\theta_i} = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \quad 2.46$$

Los coeficientes C_1 y ζ_1 provienen de la solución exacta (solución en serie infinita) y están dados en la Tabla 2.2 para un rango de números de Biot (Incropera y DeWitt, 1999), donde:

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) \cos(\zeta_n x^*) \quad 2.47$$

$$C_n = \frac{4 \operatorname{sen} \zeta_n}{2\zeta_n + \operatorname{sen}(2\zeta_n)} \quad 2.48$$

Y los valores característicos de ζ_n son las raíces positivas de la ecuación trascendente:

$$\zeta_n \tan \zeta_n = Bi \quad 2.49$$

2.2.12. Sistemas radiales con convección

De igual manera para valores de $Fo > 0,2$; la solución aproximada es:

Cilindro infinito

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) J_0(\zeta_1 r^*) = \theta_0^* J_0(\zeta_1 r^*) \quad 2.50$$

Donde θ_0^* representa la temperatura de la línea central y es de forma:

$$\theta_0^* = \frac{\theta_0}{\theta_i} = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \quad 2.51$$

Tabla 2.2 Coeficientes que se usan en la aproximación de un término para las soluciones de serie de la conducción transitoria unidimensional.

Bi	Pared plana		Cilindro infinito		Esfera	
	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1
0,01	0,0998	1,0017	0,1412	1,0025	0,1730	1,0030
0,02	0,1410	1,0033	0,1995	1,0050	0,2445	1,0060
0,03	0,1732	1,0049	0,2439	1,0075	0,2989	1,0090
0,04	0,1987	1,0066	0,2814	1,0099	0,3450	1,0120
0,05	0,2217	1,0082	0,3142	1,0124	0,3852	1,0149
0,06	0,2425	1,0098	0,3438	1,0148	0,4217	1,0179
0,07	0,2615	1,0114	0,3708	1,0173	0,4550	1,0209
0,08	0,2791	1,0130	0,3960	1,0197	0,4860	1,0239
0,09	0,2956	1,0145	0,4195	1,0222	0,5150	1,0268
0,10	0,3111	1,0160	0,4417	1,0246	0,5423	1,0298
0,15	0,3779	1,0237	0,5376	1,0365	0,6608	1,0445
0,20	0,4328	1,0311	0,6170	1,0483	0,7593	1,0592
0,25	0,4801	1,0382	0,6856	1,0598	0,8448	1,0737
0,30	0,5218	1,0450	0,7465	1,0712	0,9208	1,0880
0,4	0,5932	1,0580	0,8516	1,0932	1,0528	1,0164
0,5	0,6533	1,0701	0,9408	1,1143	1,1656	1,1441
0,6	0,7051	1,0814	1,0185	1,1346	1,2644	1,1713
0,7	0,7506	1,0919	1,0873	1,1539	1,3225	1,1978
0,8	0,7910	1,1016	1,1490	1,1725	1,4320	1,2236
0,9	0,8274	1,1107	1,2048	1,1902	1,5044	1,2488
1,0	0,8603	1,1191	1,2558	1,2071	1,5708	1,2732
2,0	1,0769	1,1795	1,5995	1,3384	2,0288	1,4793
3,0	1,1925	1,2102	1,7887	1,4191	2,2889	1,6227
4,0	1,2646	1,2287	1,9081	1,4698	2,4556	1,7201
5,0	1,3138	1,2402	1,9898	1,5029	2,5704	1,7870
6,0	1,3496	1,2479	2,0490	1,5253	2,6537	1,8338
7,0	1,3766	1,2532	2,0937	1,5411	2,7165	1,8674
8,0	1,3978	1,2570	2,1286	1,5526	2,7654	1,8921
9,0	1,4149	1,2598	2,1566	1,5611	2,8044	1,9106
10,0	1,4289	1,2620	2,1795	1,5677	2,8363	1,9249
20,0	1,4961	1,2699	2,2881	1,5919	2,9857	1,9781
30,0	1,5202	1,2717	2,3261	1,5973	3,0372	1,9898
40,0	1,5325	1,2723	2,3455	1,5993	3,0632	1,9942
50,0	1,5400	1,2727	2,3572	1,6002	3,0788	1,9962
100,0	1,5552	1,2731	2,3809	1,6015	3,1102	1,9990
∞	1,5707	1,2733	2,4050	1,6018	3,1415	2,0000

(Incropera y DeWitt, 1999)

Los valores de C_1 y ζ_1 se dan en la Tabla 2.2 (Incropera y DeWitt, 1999) para un rango de números de Biot.

Esfera

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \frac{1}{\zeta_1 r^*} \text{sen}(\zeta_1 r^*) = \theta_0^* \frac{1}{\zeta_1 r^*} \text{sen}(\zeta_1 r^*) \quad 2.52$$

Donde θ_0^* representa la temperatura del centro y es de forma:

$$\theta_0^* = \frac{\theta_0}{\theta_i} = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \quad 2.53$$

Los valores de C_1 y ζ_1 se dan en la Tabla 2.2 (Incropera y DeWitt, 1999) para un rango de números de Biot.

2.2.13. Efectos multidimensionales

A menudo se encuentran problemas transitorios en que los efectos bidimensionales o incluso tridimensionales son significativos. La solución a esta clase de problemas se obtiene de los resultados unidimensionales de las secciones anteriores.

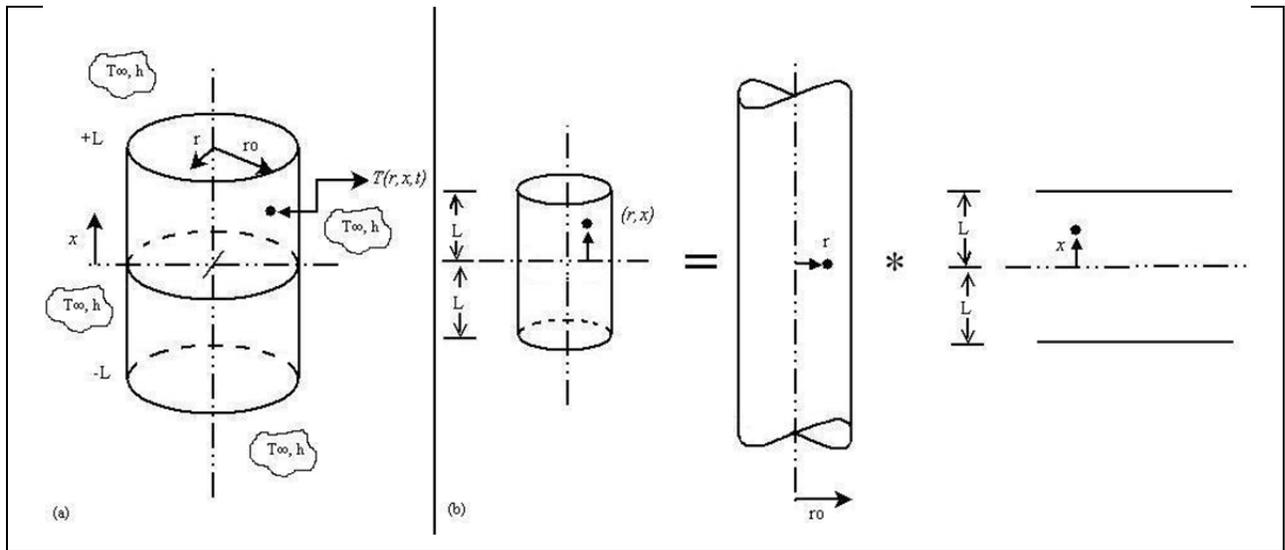


Figura 2.5 Conducción transitoria bidimensional en un cilindro corto. (a) Geometría. (b) Forma de la solución por producto de soluciones. (Incropera y DeWitt, 1999)

Considere la inmersión del cilindro *corto* de la Figura 2.5 que inicialmente está a una temperatura uniforme T_i , en un fluido de temperatura $T_{\infty} \neq T_i$. Como la longitud y el diámetro son comparables, la posterior transferencia de energía por conducción será significativa para las direcciones de las coordenadas r y x . En consecuencia, la temperatura dentro del cilindro dependerá de r , x y t .

Al suponer propiedades constantes y ninguna generación, la forma apropiada de la ecuación de calor es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.54$$

Se obtiene una solución en forma cerrada a esta ecuación mediante el método de separación de variables. El resultado final se expresaría en la siguiente forma:

$$\frac{T(r, x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \Big|_{\text{Pared plana}} * \frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \Big|_{\text{Cilindro infinito}} = \frac{\theta_0}{\theta_i} \Big|_{\text{Pared plana}} * \frac{\theta_0}{\theta_i} \Big|_{\text{Cilindro infinito}} \quad 2.55$$

Es decir, la solución bidimensional se expresa como un *producto* de soluciones unidimensionales que corresponden a las de una pared plana de espesor $2L$ y un cilindro infinito de radio r_0 . Para $Fo > 0,2$; estas soluciones son proporcionadas por las aproximaciones con un término de las ecuaciones dadas anteriormente para una pared plana y un cilindro infinito. (Incropera y DeWitt, 1999)

Tabla 2.3 Símbolos utilizados en las ecuaciones reportadas en el texto.

Símbolo	Significado	Unidades en S.I.
A	Área	m^2
Bi	Número de Biot	<i>adimensional</i>
Cp	Capacidad calórica a presión constante	J/kgK
Fo	Número de Fourier	<i>adimensional</i>
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
Gr	Número de Grashof	<i>adimensional</i>
h	Coefficiente de convección	W/m^2K
J ₀	Función de Bessel de primera especie y orden cero	-
K	Conductividad térmica	W/mK
Nu	Número de Nusselt	<i>adimensional</i>
Pr	Número de Prandtl	<i>adimensional</i>
q	Transferencia de calor	W
R	Resistencia térmica	W/K
T	Temperatura	K
α	Difusividad térmica	m^2/s
β	Coefficiente de dilatación térmica volumétrica	K^{-1}
μ	Viscosidad de un fluido newtoniano	kg/ms
ρ	Densidad	kg/m^3

(Levenspiel, 1993)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se exponen los aspectos involucrados con el desarrollo de la investigación. Tiene como finalidad principal mostrar la forma en la cual se llevaron a cabo los objetivos propuestos. Además, define las características que enmarcan a la investigación desde el punto de vista estratégico y de profundidad.

Según los objetivos planteados, la investigación a nivel de profundidad es un proyecto factible, debido a que durante su desarrollo se pretende proponer alguna alternativa para mejorar el proceso de producción de colados en la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L.

Según la estrategia o diseño de la investigación es de campo, debido a que se pretende reconocer sobre el proceso los equipos y procedimientos aplicados durante la manufactura de colados, a fin de poder determinar o proponer los cambios que se dieran lugar en el proceso para lograr la mejora del proceso de producción de colados.

Para el desarrollo sistemático de la investigación (DSI) se plantea lo siguiente:

- Diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora de frutas Ezequiel Zamora R.L.
- Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción de colados.
- Propuesta de mejoras técnicamente factibles sobre los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.
- Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía en la línea de producción de colados.
- Factibilidad económica de la propuesta seleccionada.

3.1. Diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L.

Con el fin de reconocer y comprender las etapas que integran el proceso, se procedió a realizar un análisis cualitativo de la línea de producción a través de visitas e inspecciones de dicha área, así como entrevistas con el personal involucrado en el proceso. A continuación se plantean los medios o etapas a desarrollar para lograr el cumplimiento de este objetivo.

3.1.1. Reconocimiento de la línea de producción de colados.

Mediante la inspección del área, se buscó identificar los equipos del proceso, los instrumentos de medición, las materias primas y los productos involucrados con sus respectivos medios de transporte; además, se observó el recorrido de los flujos y la metodología de trabajo en dicha área.

3.1.2. Comprensión detallada del proceso y sus etapas.

En esta fase se mantuvieron entrevistas no estructuradas con todo el personal que labora día a día en la planta, como operadores, analistas de calidad, departamento de desarrollo y mantenimiento; con el fin de profundizar el conocimiento del proceso, compartir vivencias y experiencias sucedidas en el área, así como también definir las variables involucradas en el proceso. Las entrevistas no estructuradas o abiertas se fundamentan en una guía general de contenido y el entrevistador posee toda la flexibilidad para manejarla (él es quien maneja el ritmo, la estructura y el contenido de los ítems). (Hernández Sampieri y col, 2006)

3.1.3. Identificación de variables en el proceso de manufactura de colados.

Esta fase consiste en dar respuesta a las causas que afectan el funcionamiento adecuado del proceso y que ejercen efectos negativos en la producción de colados. Para lograr esto, se realizaron entrevistas no estructuradas o entrevistas abiertas a los operadores, supervisores, analistas de calidad y departamento de mantenimiento. Las entrevistas deben ser abiertas, sin

categorías preestablecidas, de tal forma que los participantes expresen de la mejor manera sus experiencias y sin ser influidos por la perspectiva del investigador o por los resultados de otros estudios; asimismo, las categorías de respuesta las generan los mismos entrevistados. Al final cada quien, de acuerdo con las necesidades que plantee el estudio, tomará sus decisiones. (Hernández Sampieri y col, 2006)

3.1.4. Reconocimiento de los materiales y equipos usados en la línea de producción de colados.

En esta fase se realizó un reconocimiento de los equipos mediante un recorrido por la planta, donde se anotaron las especificaciones de los equipos y materiales involucrados en la producción de colados.

3.2. Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.

Haciendo uso de las herramientas anteriores se establecieron los factores que influyen negativamente en el proceso de producción de colados.

3.2.1. Realización de entrevistas con el personal especializado.

Se realizaron entrevistas semi estructuradas a los operadores, supervisores y analistas de calidad, donde se evidenciaron las fallas existentes en dicha línea. Regularmente en la investigación cualitativa, las primeras entrevistas son abiertas tipo piloto, y van estructurándose conforme avanza el trabajo de campo, pero no es usual que sean estructuradas. Debido a ello, el entrevistador debe ser altamente calificado en el arte de entrevistar (La recomendación es que sea el propio investigador quien realice las entrevistas). (Hernández Sampieri y col, 2006)

3.2.2. Identificación de las variables del proceso que influyen directamente en la pérdida de energía de la línea de producción de colados.

Para la identificación de las variables que influyen directamente en la pérdida de energía se debe observar a qué consecuencias lleva cada una de las fallas consideradas anteriormente. De éstas, las que conlleven a un gasto de energía innecesario que pueda ser evitado, están relacionadas directamente con las pérdidas de energía.

3.2.2.1. Realización de un diagrama causa-efecto preliminar.

El diagrama causa-efecto se utiliza para organizar y representar las diferentes propuestas sobre las causas de un problema. Consiste en agrupar las causas potenciales del problema en seis ramas principales correspondientes: mano de obra, métodos, máquinas, materiales, medición y medio ambiente. Estas causas potenciales pueden tener causas asociadas o sub-causas que derivan a la rama correspondiente, y así sucesivamente que conlleve a las causas reales o más influyentes (Pande y col, 2002). En la figura 3.1 se ilustra el esquema antes mencionado.

La manera para elaborar un diagrama causa-efecto consta de los siguientes pasos:

- Definir el problema a analizar.
- Seleccionar el tipo de diagrama de Ishikawa que se va a emplear.
- Buscar todas las causas probables.
- Trazar un segmento horizontal cuyo extremo derecho se dibuja un recuadro, donde se escribe el efecto del problema y ubicar las causas principales en forma ramificada a la línea horizontal.
- Ubicar las sub-causas de acuerdo a su relación con las causas principales.

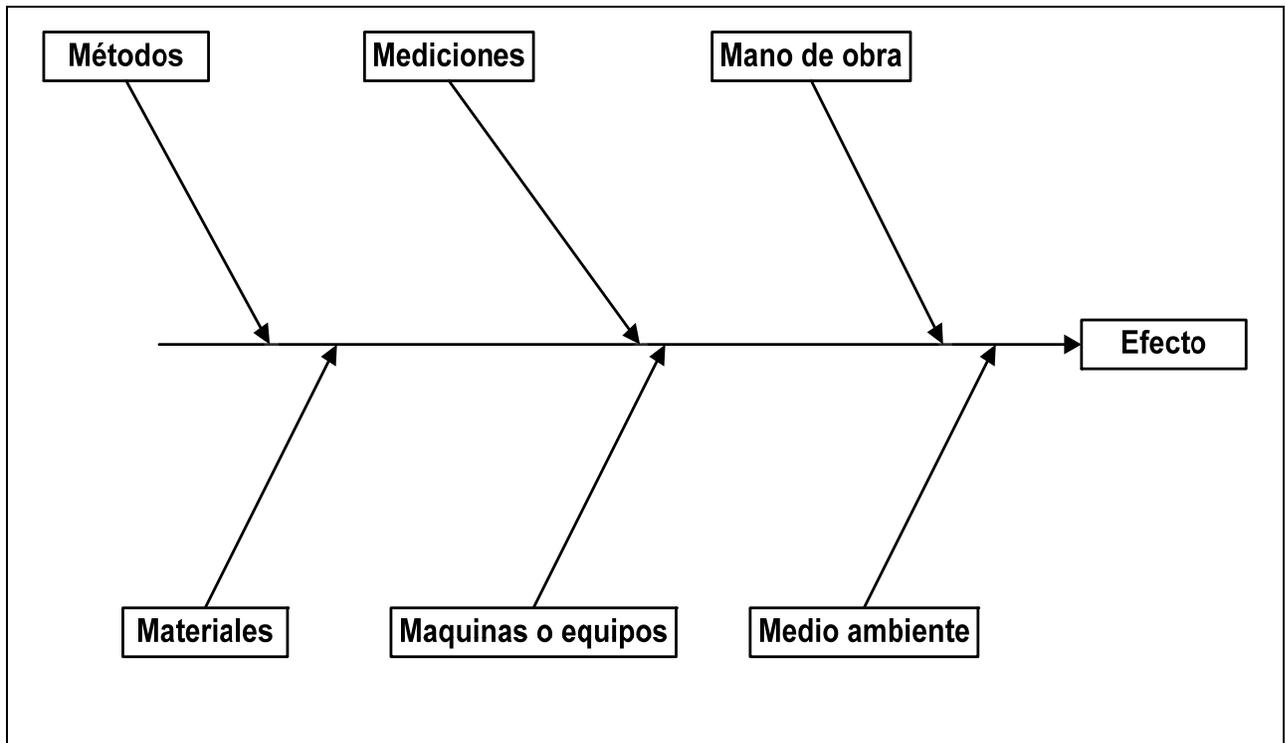


Figura 3.1 Diagrama de Ishikawa correspondiente al método 6 M's. (Sociedad latinoamericana para la calidad, 2000)

3.2.3. Determinación de las variables que afectan en mayor medida la pérdida de energía de la línea de producción de colados.

Con la finalidad de proporcionar un análisis cuantitativo de las causas obtenidas, se determinan los puntos críticos mediante el método reportado (Pande y col, 2002).

- Escribir y enumerar las causas para ser ponderadas en la tabla.
- Definir los efectos no deseados sobre el problema estudiado, según:
 - P1= Funcionamiento inadecuado del sistema.
 - P2= Incumplimiento de los parámetros de calidad en el producto.
 - P3= Riesgos laborales y ergonómicos en el sistema de producción.
- Establecer una escala de valoración que exprese el grado de impacto sobre los efectos no deseados. La escala para el análisis cuantitativo:
 - 1-2: Impacto mínimo; causan efectos despreciables sobre el producto.

- 3-4: Impacto leve; causan pequeñas irregularidades en el producto.
- 5-6: Impacto moderado; causan irregularidades del producto que ocasionan descontentos al cliente.
- 7-8: Impacto elevado; causan altas irregularidades en el producto que ocasionan la devolución del mismo.
- 9-10: Impacto máximo; ocasionan problemas de seguridad en el proceso, pudiendo incumplir con alguna regulación o ley gubernamental.
- Determinar la ponderación de cada causa en base al total de la sumatoria de la valoración de los efectos.

Es de señalar que esta valoración se obtiene a través de consultas con el personal técnico de planta y consultas con el gerente de la planta y el supervisor de la línea de producción de colados. En el apéndice B se muestra la herramienta utilizada para la elaboración de dicha matriz:

Una vez ponderados y cuantificados los problemas más relevantes, se procede a la selección del más significativo.

3.2.4. Elaboración del diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto es un gráfico donde se organizan diversas clasificaciones de datos por orden descendente, de izquierda a derecha por medio de barras sencillas después de haber reunido los datos para calificar las causas, a fin de asignar un orden de prioridades.

El nombre de Pareto fue dado por Joseph Juran en honor del economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923) quien realizó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en el cual descubrió que la minoría de la población poseía la mayor parte de la riqueza y la mayoría de la población poseía la menor parte de la riqueza. (Pande y col, 2002)

Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

Por lo tanto, el análisis de Pareto es una técnica que separa los "pocos vitales" de los "muchos triviales". Un gráfico de Pareto se utiliza para separar gráficamente los aspectos significativos de un problema de los triviales, de manera que un equipo sepa dónde dirigir sus esfuerzos para mejorar. Reducir los problemas más significativos (las barras más largas en un gráfico de Pareto) sirve más para una mejora general que reducir los más pequeños. Con frecuencia, un aspecto tendrá el 80% de los problemas.

En el resto de los casos, dos o tres aspectos serán responsables del 80% de los problemas. La manera de utilizar el Pareto es la siguiente:

1. Seleccionar categorías lógicas para el tópico de análisis identificado (incluir el periodo de tiempo).
2. Reunir datos. La utilización de una lista de chequeo puede ser de mucha ayuda en este paso.
3. Ordenar los datos de la mayor categoría a la menor.
4. Totalizar los datos para todas las categorías.
5. Calcular el porcentaje del total que cada categoría representa.
6. Trazar los ejes horizontales (x) y verticales (y primario - y secundario).
7. Trazar la escala del eje vertical izquierdo para frecuencia (de 0 al total, según se calculó anteriormente), de izquierda a derecha trazar las barras para cada categoría en orden descendente. Si existe una categoría "otros", debe ser colocada al final, sin importar su valor; esto es, no debe tenerse en cuenta al momento de ordenar de mayor a menor la frecuencia de las categorías.
8. Trazar la escala del eje vertical derecho para el porcentaje acumulativo, comenzando por el 0 y hasta el 100%
9. Trazar el gráfico lineal para el porcentaje acumulado, comenzando en la parte superior de la barra de la primera categoría (la más alta)
10. Dar un título al gráfico, agregar las fechas de cuándo fueron reunidos los datos y citar la fuente de ellos.
11. Analizar la gráfica para determinar los "pocos vitales"

3.2.4.1. Selección de las variables que más afectan las pérdidas de energía en la producción de colados.

Se seleccionan aquellas variables que causan el 80% de los problemas de manejo de materiales. De esta forma se establece el orden de prioridad que deben abordarse para mejorar las condiciones del proceso.

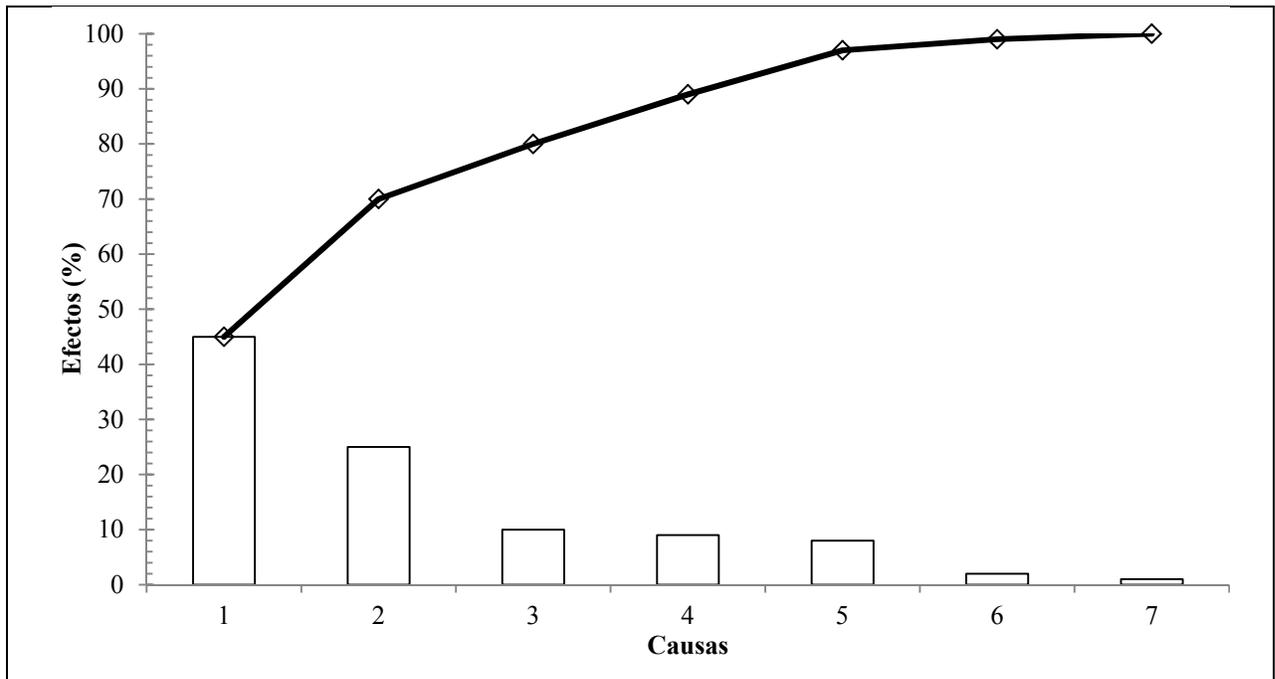


Figura 3.2 Ejemplo de un diagrama de Pareto para seleccionar las variables que más afectan algún problema. (Pande y col, 2002)

3.2.5. Construcción o elaboración de un diagrama causa y efecto depurado.

Haciendo uso de las herramientas desarrolladas anteriormente se obtuvo un nuevo diagrama causa-efecto que hace énfasis en las variables que afectan en mayor medida las pérdidas de energía en el proceso de producción de colados.

3.3. Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.

El objetivo de esta etapa consistió en hacer propuestas que proporcionen reducciones en el gasto de energía del proceso de manufactura de colados.

3.3.1. Realización de una tormenta de ideas donde se propongan diferentes alternativas para reducir las pérdidas de energía en el proceso de manufactura.

Preparación: El grupo debe conocer el tema o área de interés sobre el cual se va a trabajar, con cierta anticipación con el fin de informarse y pensar sobre él.

Desarrollo:

- El director del grupo precisa el problema a tratar, explica el procedimiento y las normas mínimas que han de seguirse dentro del clima informal básico. Puede designar a un secretario para registrar las ideas que se expongan. Será útil utilizar un grabador.
- Las ideas que se expongan no deben ser censuradas ni criticadas directa o indirectamente; no se discute la factibilidad de las sugerencias. Debe evitarse todo tipo de manifestaciones que coarte o pueda inhibir la espontaneidad. Los miembros deben centrar su atención en el problema y no en las personas.
- Los miembros exponen su punto de vista sin restricciones, y el director solo interviene si hay que distribuir la palabra entre varios que desean hablar a la vez, o bien si las intervenciones se apartan demasiado del tema central. A veces estimula a los remisos, y siempre se esfuerza por mantener una atmósfera propicia para la participación espontánea.
- Terminado el plazo previsto para la creación de ideas, se pasa a considerar - ahora con sentido crítico y en un plano de realidad – la viabilidad o practicidad de las propuestas más valiosas. Se analizan las ideas en un plano de posibilidades prácticas, de eficiencia, de acción concreta.
- El director del grupo hace un resumen y junto con los miembros extrae las propuestas más valiosas para su posterior desarrollo.

La tormenta de ideas estimula la creatividad lingüística verbal propia del hemisferio cerebral izquierdo, junto con un enfoque analítico sintético, pues cada sujeto aporta trozos de realidad en sus ideas caóticas y desorganizadas, con las que hay que recomponer el todo mediante la síntesis clasificatoria, que obligatoriamente habría de seguir a esta técnica. (Kastika, 2002)

Las reglas que regulan la práctica de la tormenta de ideas son:

- Posponer la crítica; no rechazar ni censurar ninguna idea por absurda o extraña que parezca.
- Escuchar a los demás para añadir ideas propias y mejorar sus ideas originales; escalada de pensamiento, sin entrar en críticas.
- Proceder con rapidez sin pararse en discursos ni en discusiones de ningún tipo; cada sujeto suelta una frase o expresión sin largas explicaciones.

Los fallos más comunes en las tormentas de ideas son:

- Caer en discusiones paralizantes. La tormenta de ideas no es un grupo de discusión en el que se critican o rechazan ideas de otros que no gusten y en el que se quisieron imponer las propias.
- Dar como respuesta solamente palabras; cuando esto ocurra, por cada palabra los participantes elaborarán frases que completen y precisen su pensamiento o lo amplíen.
- Reducir la tormenta de ideas a la promoción de ideas sin posteriores aplicaciones: es preciso que el caos de ideas que supone toda tormenta de ideas se someta a organizaciones mediante clasificaciones y esquemas gráficos.

(Mora Vanegas, 2008)

3.3.2. Revisión bibliográfica de los aspectos técnicos referentes a las alternativas propuestas.

En el apéndice C se encuentra la tabla con los aspectos técnicos de las diferentes alternativas propuestas.

3.3.3. Desarrollo de las alternativas propuestas aplicando los respectivos modelos matemáticos.

Las alternativas tecnológicas antes propuestas se desarrollaron para conocer su impacto en el proceso, y luego ordenarlas según su prioridad desde el punto de vista técnico y económico.

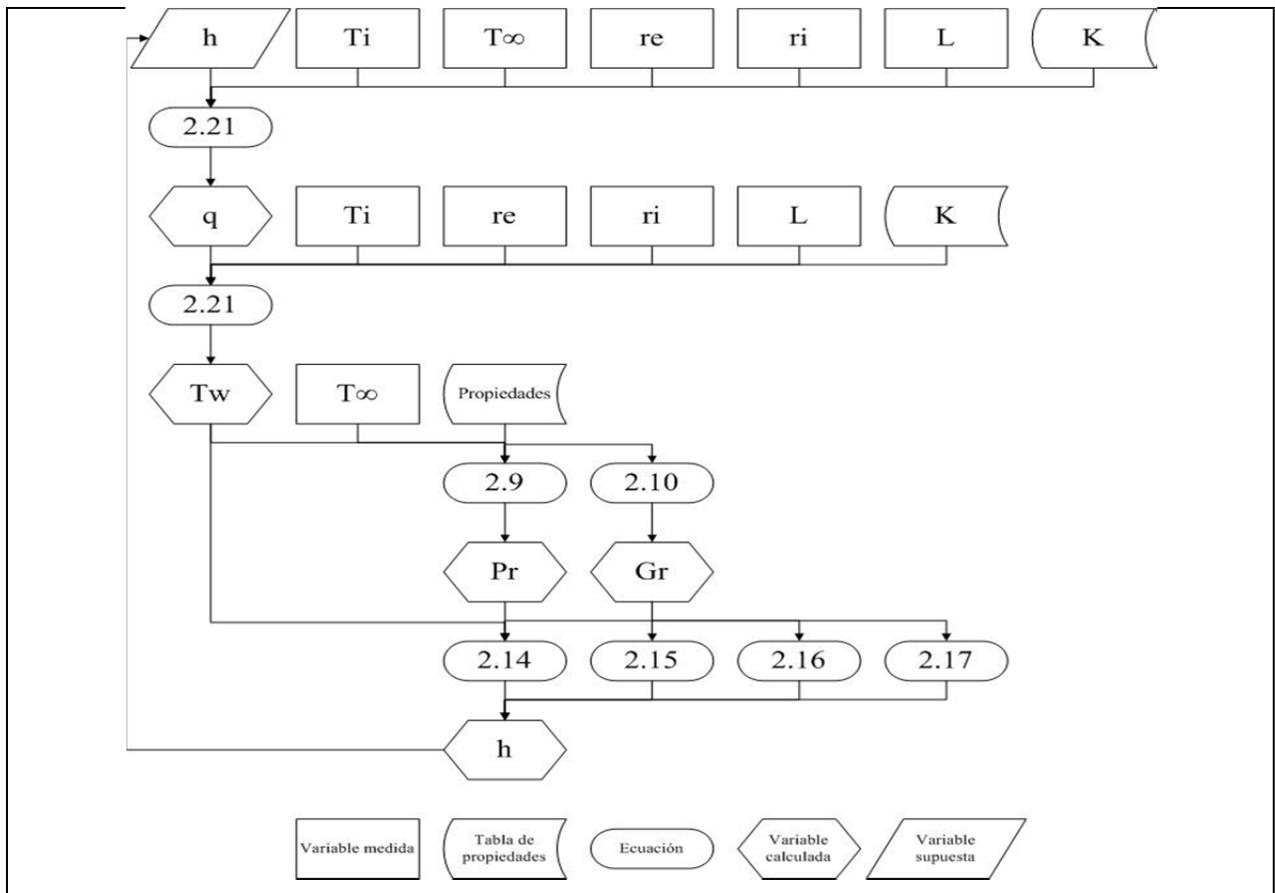


Figura 3.3 Metodología usada para determinar la energía que se pierde por las tuberías y las marmitas.

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran las metodologías de cálculo usadas para conocer el impacto de las alternativas propuestas una vez implementadas.

Para mayor comprensión de estas metodologías, se recomienda revisar los cálculos típicos en el apéndice A.

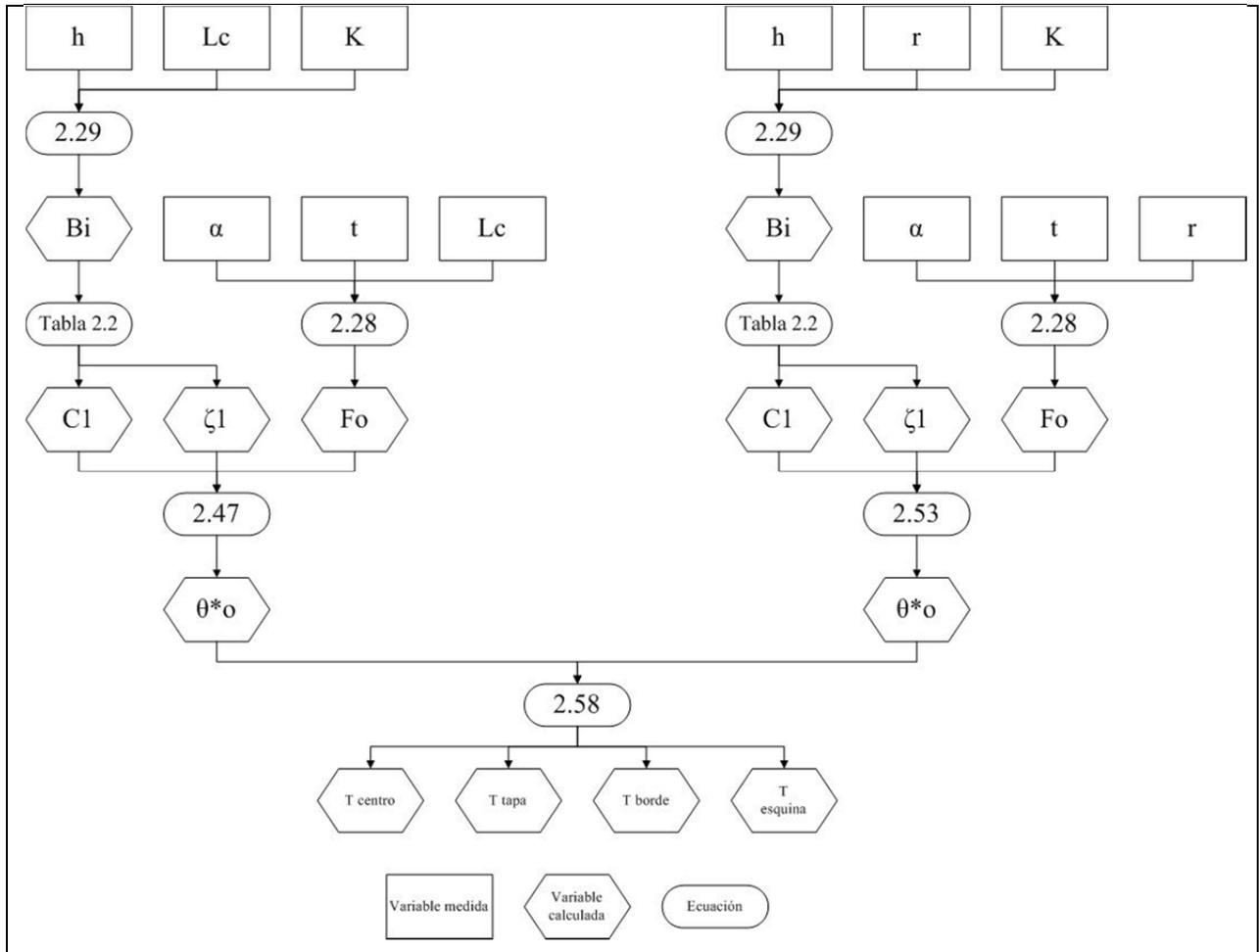


Figura 3.4 Metodología utilizada para determinar la temperatura de los frascos después de pasar por el túnel de enfriamiento.

3.4. Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.

Esta etapa consistió en seleccionar la mejor propuesta que reduzca el gasto energético de la línea de producción de colados.

3.4.1. Establecimiento de un criterio de ponderación para las alternativas propuestas.

Este es un paso preliminar a la construcción de la matriz utilizada para elegir la mejor alternativa propuesta. Cada criterio tendrá una ponderación dependiendo de su importancia e influencia en el proceso, evaluándose en una escala del 1 al 100%.

3.4.2. Comparación de las alternativas propuestas.

Esto se realizó comparando cada una de las propuestas y haciendo uso de una matriz de ponderación. Los pasos para lograr el establecimiento de la alternativa más adecuada fueron los siguientes:

- Ponderación de las alternativas planteadas.
- Aplicación de la matriz de selección.
- Selección de la estrategia más adecuada.

Para la escogencia se utilizó una matriz de selección donde se definen los parámetros de discriminación y ponderación. Su construcción se hizo mediante los siguientes pasos:

1. Definir las alternativas que van a ser jerarquizadas.
2. Definir los criterios de evaluación.
3. Definir el peso de cada uno de los criterios:

Cada criterio tendrá una ponderación dependiendo de su importancia e influencia en el proceso, evaluándose en una escala del 1 al 100%.

4. Construir la matriz.
5. Definir la escala de cada criterio.

Los criterios se valoran en una escala entre 1 y 5, siendo:

Muy malo:	1 (20 % del peso asignado)
Malo:	2 (40 % del peso asignado)
Regular:	3 (60 % del peso asignado)
Bueno:	4 (80 % del peso asignado)
Muy bueno:	5 (100 % del peso asignado)

6. Valorar cada alternativa con cada criterio (usando las escalas y pesos definidos anteriormente).
7. Multiplicar el valor del peso, por el porcentaje de cada escala (múltiplo).
8. Sumar todas las casillas de la alternativa y anotar el resultado en la casilla total.

3.4.3. Elección de la alternativa tecnológica que más se adecúe a las necesidades de la empresa.

La comparación de las alternativas propuestas se realiza una vez construida la matriz de selección. La mejor alternativa será la que tenga la mayor sumatoria en la casilla total. El modelo de matriz se muestra en la tabla B.7.

3.5. Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas.

En esta etapa se determinó la factibilidad económica de la alternativa elegida en la que se toma en cuenta los costos de adquisición, instalación y mantenimiento de los equipos, así como también el consumo de energía, entre otros.

3.5.1. Estimación de los flujos monetarios actuales de la línea de producción de colados de procesadora de frutas.

Son los desembolsos que se requieren para que el proyecto, una vez puesto en marcha, continúe operando normalmente. Vienen dados por la: materia prima y otros materiales, personal (sueldos y salarios), mantenimiento y repuestos, combustible y energía, distribución y ventas, promoción y publicidad, administración, otros. (Giugni de Alvarado y col., 2005):

$$\text{Cop} = \text{MP} + \text{Sa} + \text{Mant} \quad 3.1$$

Donde:

Cop: costos operacionales, (U.S \$).

MP: costo de la materia prima empleada anualmente, (U.S \$).

Sa: salarios de los operarios que operan en el proceso. (Sueldo mínimo), (U.S \$).

Mant: costos por mantenimiento, 2% del capital fijo, (U.S \$).

a) Costos de materia prima: costo asociados a la compra de materia prima: (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$\text{MP} = \sum(\text{Cant. MP} * \text{CostoMP}) \quad 3.2$$

Donde:

Cant. MP: cantidad de materia prima empleada, (kg).

Costo MP: costo de la materia prima, (U.S \$/kg).

b) Salario de los operarios: costo asociado a los salarios de los operarios: (Giugni de Alvarado y col., 2005).

$$\text{Sa} = \sum \text{Sop} \quad 3.3$$

Donde:

Sop: salario anual de los operarios, (U.S \$).

c) Mantenimiento de los equipos: costo asociado al mantenimiento de los equipos adquiridos. (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$\text{Mant} = 0,02 * \text{CF} \quad 3.4$$

Donde:

CF: capital fijo.

3.5.2. Estimación del flujo monetario para llevar a cabo la propuesta.

La inversión inicial del sistema viene dada por todos los equipos, tuberías y accesorios nuevos a implementar en la línea de producción, así como también un fondo de reserva en donde se puedan iniciar las operaciones, la inversión inicial consta de la sumatoria del capital fijo y el capital de trabajo.

El capital de trabajo comprende aquella porción inicial destinada a la compra de los activos fijos tangibles e intangibles, mientras que el capital fijo es la cantidad de dinero necesario para cubrir los requerimientos mínimos de activos circulantes; es decir, los fondos necesarios para cubrir los gastos antes de que se produzcan los primeros ingresos.

a) Costo de los equipos a usar: (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$\text{CE} = \text{Cant.Equipo}_1 * \text{Costo}_1 + \text{Cant.Equipo}_2 * \text{costo}_2 + \dots + \text{Cant.Equipo}_{(i)} * \text{Costo}_{(i)} \quad 3.5$$

Donde:

CE: costos producidos por los equipos, (U.S \$)

Cant.Equipo _(i): cantidad de equipos empleados de un mismo tipo. (adim).

Costo _(i): costo unitario del equipo, (U.S \$).

i: tipo de equipo, (adim)

b) Costo de instalación de los equipos

Se emplea la relación donde es el 30% del costo de los equipos principales, para obtener el valor de la instalación de los mismos: (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$\text{Equi.Instalados} = 0,3 * \text{CE} \quad 3.6$$

Donde:

Equi. Instalados: costo de instalación de los equipos, (U.S \$).

CE: costo de los equipos instalados.

c) Inversión inicial

Es la cantidad de dinero que la empresa va a invertir en el proyecto; consta de dos partes: el capital fijo CF y el capital de trabajo CT. (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$\text{II} = \text{CF} + \text{CT} \quad 3.7$$

Donde:

II: representa la inversión inicial, (U.S \$).

CF: representa el capital fijo, (U.S \$).

CT: capital de trabajo, 15% del CF.

- **Capital Fijo:** viene dado por el costo de los equipos, además del costo de instalación así como el costo de entrenamiento de los operadores y los imprevistos que puedan suceder durante la instalación, tanto el entrenamiento como los imprevistos representan el 5% del costo de los equipos adquiridos. (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$CF=AFT+AFI \quad 3.8$$

Donde:

AFI: activo fijo intangible, (U.S \$).

AFT: activo fijo tangible, (U.S \$).

Finalmente el capital fijo viene dado por: (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$CF = CE + \text{instalación} + \text{imprevistos} + \text{entrenamiento de operarios} \quad 3.9$$

Donde:

CE: costo de los equipos, (U.S \$).

Instalación: costo de instalación de los equipos principales, (U.S \$).

Imprevistos: 5% del costo de los equipos, (U.S \$). (Giugni de Alvarado y col, 2005)

Entrenamiento de operarios: 5% del costo de los equipos, (U.S \$). (Giugni de Alvarado y col., 2005)

El capital de trabajo representa el 15 % del capital fijo. (Giugni de Alvarado y col., 2005)

$$CT=0,15*CF \quad 3.10$$

3.5.3. Estimación del flujo monetario del proceso después de la incorporación de la alternativa tecnológica.

Son los desembolsos que se requieren para que el proyecto, una vez puesto en marcha, continúe operando normalmente. Vienen dados por la: materia prima y otros materiales, personal (sueldos y salarios), mantenimiento y repuestos, combustible y energía, distribución y ventas, promoción y publicidad, administración, otros. (Giugni de Alvarado y col., 2005)

Esto será el nuevo costo de operación estimado para después de implementar la alternativa seleccionada.

3.5.4. Comparación de los flujos monetarios antes y después de la incorporación de la propuesta tecnológica.

El tiempo de pago representa el tiempo requerido para que los flujos monetarios netos recuperen la inversión inicial a una tasa mínima de rendimiento igual a 0, (Giugni de Alvarado y col., 2005):

$$-II + \sum_{i=1}^n (Cop_f - Cop_0)_i = 0 \quad 3.11$$

La ecuación 3.11 se usa para determinar en cuanto tiempo (t) se recuperara la inversión inicial debida a la implementación de la alternativa tecnológica seleccionada para la reducción de la pérdida de energía en la línea de producción de colados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, así como su respectiva interpretación y análisis.

4.1 Diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L.

El diagnóstico se efectúa con la finalidad de contar con valores reales que sirvan como punto de partida para el estudio detallado del proceso, permitiendo así identificar las variables críticas en el, las condiciones de operación, sus necesidades y requerimientos.

4.1.1 Reconocimiento de la línea de producción de colados.

Mediante observación sistemática del proceso, entrevistas con el supervisor y gerente de producción, se reconoció la línea de producción de colados, donde se identificó que en dicha área existe un tanque de mezclado, dos marmitas para la cocción, un intercambiador de calor que tiene como función asegurar que la temperatura del colado se encuentre entre el rango de 75°C y 80°C, un calentador de frascos para esterilizar los frascos antes del llenado, una envasadora, una tapadora y un túnel de enfriamiento con dos etapas para bajar la temperatura de los frascos de colado antes de embalarlos. Se observó que el traslado de las materias primas al proceso es manual, al igual que el proceso de embalaje y que el traslado de los frascos durante el proceso de llenado, tapado y enfriado es a través de una cinta transportadora.

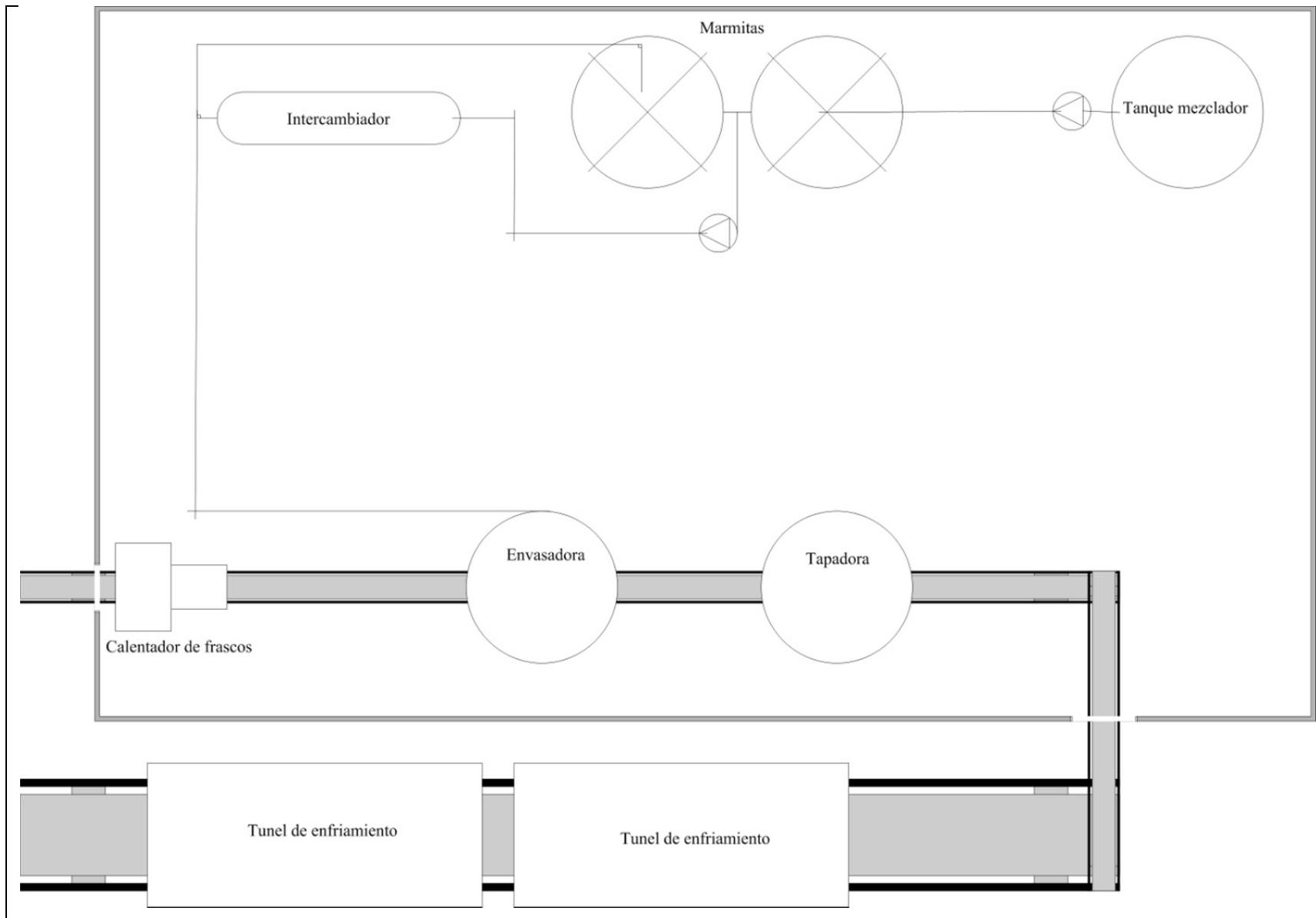


Figura 4.1 Distribución en planta de la línea de producción de colados en la Procesadora de Frutas Ezequiel Zamora R.L.

4.1.2 Comprensión detallada del proceso y sus etapas.

Una vez reconocido el área, se procedió a comprender con más detalles la línea de producción; para ello se realizaron entrevistas no estructuradas con el personal que labora día a día en dicha área.

Al evaluar las entrevistas realizadas se identificaron algunos puntos relevantes. La falta de aislante tanto en las tuberías que transportan fluidos a alta temperatura (vapor y colado), como en las marmitas y el intercambiador de calor, pueden producir accidentes laborales, además de pérdidas de energía en el proceso de producción, por lo que representan una pérdida de dinero por el gasto de combustible fósil utilizado para todos los procesos de calentamiento en la línea de producción de colados.

Al tener claros los componentes que conforman el proceso, se puede describir de manera más explícita lo que se está representando en la figura 4.1.

- En la esquina superior derecha se encuentra el tanque de mezclado con agitación mecánica y es llenado de forma manual por los operadores.
- A la izquierda del tanque de mezclado se encuentran dos marmitas con agitación mecánica, conectadas entre sí por el fondo, para repartir el colado entre ambas en partes iguales; allí se realiza la cocción del colado.
- En la esquina superior izquierda se encuentra un equipo de intercambio térmico, donde se asegura que la temperatura del colado se encuentre entre 75°C y 80°C; en caso contrario, el colado se recircula automáticamente de la salida del intercambiador hacia las marmitas.
- En el centro de la figura, a la izquierda, se encuentra el calentador de frascos.
- A la derecha del calentador de frascos está ubicada la envasadora, que llena los frascos con colado.
- A la derecha de la envasadora se encuentra la tapadora, que usa vapor para calentar las tapas y hacer un llenado en caliente.

- En la parte inferior está el túnel de enfriamiento, que se emplea para enfriar los frascos de colados ya envasados.

Luego de describir cada estructura del esquema, se puede visualizar mejor el proceso

4.1.3 Identificación de variables en el proceso de manufactura de colados.

En esta etapa se realiza la identificación de las variables determinantes en el comportamiento actual del proceso, en base al conocimiento adquirido durante las actividades y toma de datos en la línea de producción de colados.

Como primer paso se evaluaron las condiciones operacionales de los equipos (Ver tablas 4.1, 4.2 y 4.3), estas condiciones brindan una mejor perspectiva del medio ambiente del área de trabajo y genera a su vez las posibles fallas que pueden ocurrir en la línea.

Como se ha dicho con anterioridad, se cuenta con una buena maquinaria instalada y bastante automatizada, pero existen muchas pérdidas de energía en la producción que hay que reducir, por lo que es el efecto que se debía analizar. Para ello se determinaron y estudiaron a fondo los principales factores que influyen directa o indirectamente sobre dicho efecto.

Estos factores fueron evaluados a través de visitas a la empresa y de la aplicación de la metodología KAIZEN en el área, generando las posibles causas que produzcan dicho efecto. (Imai, 2001)

Los principales factores o causas que influyen en el proceso y que fueron evaluados, se han agrupado en cuatro categorías importantes: mano de obra, maquinaria, método y medición.

Estas causas serán ordenadas y estructuradas en un diagrama causa-efecto general que permitirá plantear todas las causas reales y potenciales del problema o efecto, generando además el descarte de factores que ejercen poca influencia en el proceso.

Tabla 4.1 Especificaciones de la capacidad de los equipos.

Equipo	Altura h (cm)	Diámetro D (cm)	Volumen (cm³)	Observaciones
Tanque de mezclado	130	50	1021020	-
Marmita 1	75	85	481630	-
Marmita 2	75	85	481630	-
Envasadora	35	60	98960	-

Tabla 4.2 Especificaciones de las tuberías y condiciones de operación.

Fluido	Material	Diámetro (in)	Longitud (cm)	Temperatura del fluido (°C)
Colado	Acero inoxidable	3 ½	960	75
Vapor	Acero galvanizado	3/4	920	160

Tabla 4.3 Condiciones de operación de los equipos y otras especificaciones.

Equipo	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Frascos/min	Observaciones
Marmita 1	122	30	-	-
Marmita 2	122	30	-	-
Intercambiador de calor	122	30	-	7 pasos-tubos 1 paso-coraza
Calentador de frascos	123	-	-	-
Envasadora	-	-	100	-
Tapadora	-	-	100	-
Túnel de enfriamiento 1	29	-	-	5 m longitud
Túnel de enfriamiento 2	4	-	-	5 m longitud

4.2 Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.

En esta etapa se realiza la identificación de cada una de las variables del proceso involucradas en las pérdidas de energía, que puedan ser evitadas, en la manufactura de colados de frutas.

4.2.1. Realización de entrevistas con el personal especializado.

Se realizaron entrevistas semi estructuradas a los operadores, supervisores y analistas de calidad, donde se evidenciaron las fallas existentes en dicha línea. La guía usada para realizar la entrevista y las respuestas obtenidas se encuentran en las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

Tabla 4.4 Guía de entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

1.	¿Las marmitas trabajan correctamente?
2.	¿Es adecuado el intercambiador de calor?
3.	¿El calentador de frascos trabaja correctamente?
4.	¿La envasadora trabaja correctamente?
5.	¿La tapadora funciona correctamente?
6.	¿Es adecuado el túnel de enfriamiento?
7.	¿Se pueden reparar las fallas de estos equipos?
8.	¿Hace falta algún equipo o material extra en la línea de producción? ¿Por qué?
9.	¿Considera que algún equipo está de sobra en la línea de producción? ¿Por qué?
10.	¿Tienen buen aislamiento las tuberías de fluidos caliente?
11.	¿Tienen buen aislamiento las marmitas?

Tabla 4.5 Respuestas del operador de línea entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

Personal entrevistado: Operador de línea	
1.	Si, aunque se pueden sufrir quemaduras si no se tiene cuidado.
2.	Creo que no hace falta. Igual, si no se tiene cuidado se pueden sufrir quemaduras.
3.	Si.
4.	Si.
5.	Si.
6.	Si.
7.	Si, de tener los repuestos se podría.
8.	No, el proceso parece estar bien como está actualmente.
9.	Si. El intercambiador de calor, la válvula automática parece ser la que hace todo el trabajo.
10.	No.
11.	No.

Tabla 4.6 Respuestas del supervisor de línea entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

Personal entrevistado: Supervisor de línea	
1.	Si, en todos los aspectos, a excepción de la falta de aislamiento.
2.	Si.
3.	No. No calienta lo suficiente.
4.	Si.
5.	No. Tiene fugas de vapor.
6.	No. No se han hecho estudios de su funcionamiento.
7.	Si. Se requiere cierta inversión.
8.	Si. Un transportador para voltear los frascos antes de llenarlos y un detector de metales.
9.	No.
10.	No.
11.	No.

Tabla 4.7 Respuestas del analista de calidad entrevistado sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

Personal entrevistado: Analista de calidad	
1.	Si.
2.	Si.
3.	No. Debe calentar más los frascos.
4.	Si.
5.	Si.
6.	Si.
7.	Si. Se deben conseguir los repuestos.
8.	Si. Un equipo para vaciar los frascos que puedan estar sucios.
9.	No.
10.	No.
11.	No.

4.2.2. Realización de un diagrama causa-efecto preliminar.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama causa-efecto, elaborado en forma de espina de pescado como es usual en su construcción, donde el efecto son las pérdidas de energía en la producción de colados observándose en la línea principal horizontal, todas las demás líneas inclinadas hacia ella, son las posibles causas o sub-causas que podrían generar el problema dentro del efecto estudiado. Todas y cada una de las causas fueron establecidas en el diagrama según información obtenida por las consultas al personal y observación directa del proceso. Este diagrama ofrece ventajas para visualizar gráficamente todo el entorno de un efecto, para así tomar las acciones correctivas correspondientes.

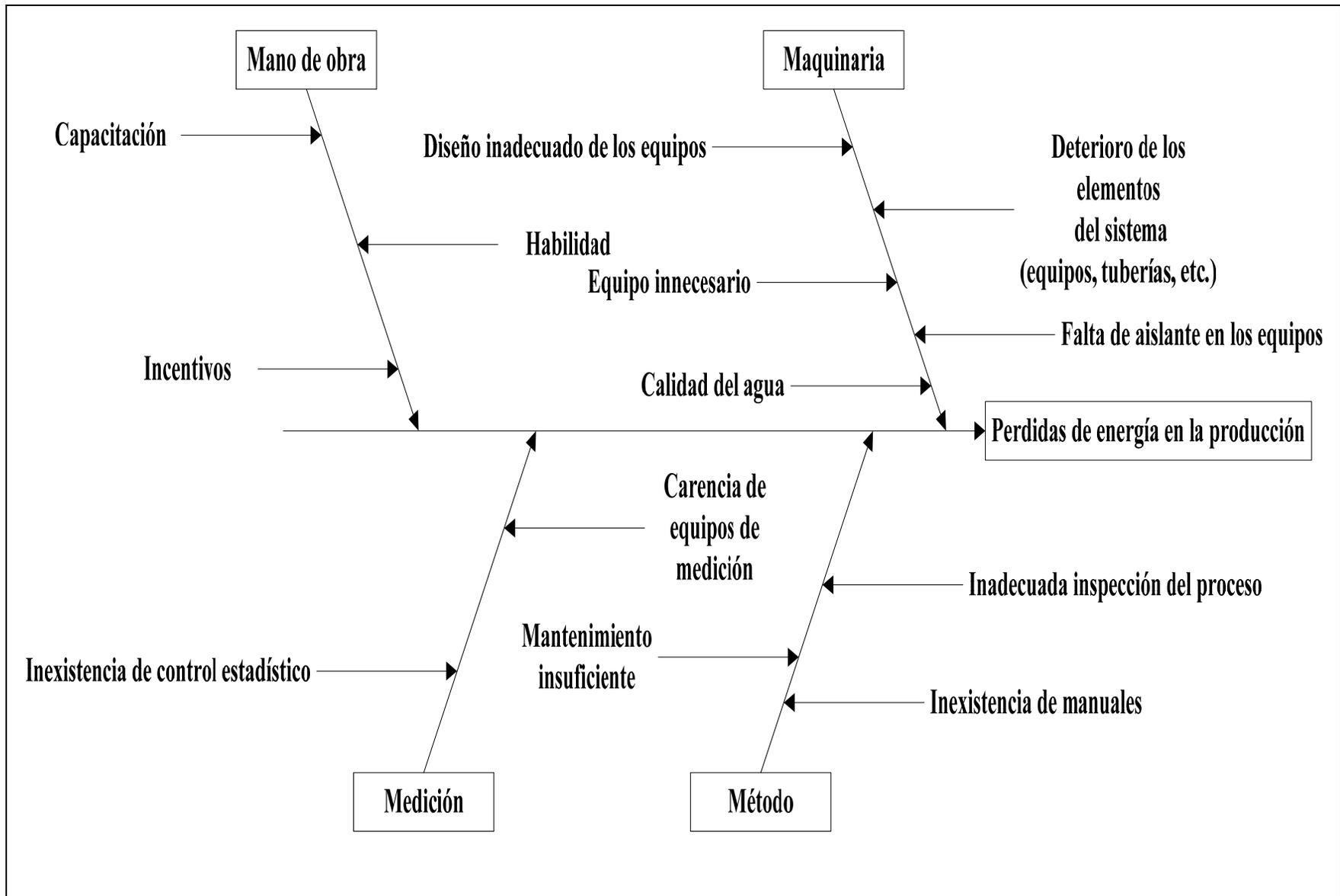


Figura 4.2 Diagrama causa – efecto de las variables que influyen en las pérdidas de energía en la producción de colados.

Aunque materiales y medio ambiente deben formar parte del diagrama causa – efecto según el método de las 6 M's, se descartó materiales, ya que no es posible ejercer alguna acción correctiva debido a que la producción de pulpa de fruta depende de un agente externo del área de producción, estando fuera del dominio del trabajo de investigación. Lo mismo sucede con el suministro de agua. Por otra parte, el medio ambiente se encuentra fuera de estudio ya que la línea de producción fue instalada en el sitio en que se encuentra actualmente por planes anteriores a este trabajo.

- **Mano de obra**

Comprende a todas las personas que forman parte del proceso de producción de colados.

El operario encargado de desarrollar los diferentes tipos de colados bajo los parámetros indicados por el departamento de calidad y de producción, debe velar y lograr que la producción se lleve a cabo satisfactoriamente; sin embargo, éste posee diversidad de ocupación, lo que causa fatiga en el trajinar del día, retardando el proceso general y saliéndose de las especificaciones o parámetros planteados por la empresa. Además, esta variedad de ocupaciones es sin recibir alguna remuneración extra, causando esto faltas al trabajo en las cuales llega a ocurrir en ocasiones que las marmitas se encuentren vacías en pleno funcionamiento.

Se requiere de un supervisor de calidad que verifique las condiciones de los productos y del proceso, así como del resultado. En este caso, el supervisor está al tanto de todo y el tiempo que requiere para el análisis del producto le es suficiente, no mostrando fallas en esta etapa.

Analizando lo anterior, se considera que la mano de obra influye de forma directa en las pérdidas de energía, ya que están encargados de poner en práctica los métodos, y deben estar entrenados eficientemente y tener la experiencia necesaria para el buen funcionamiento de la línea. Sin embargo, no se tomó en cuenta este factor debido a que representa una variable poco controlable dentro del proceso.

- **Maquinaria**

En esta categoría se incluyen todos los equipos y materiales utilizados en el proceso.

Estos equipos no deben presentar un estado físico de deterioro o una inadecuada manipulación, ya que pueden influir directamente en los resultados; por ende, ameritan un buen mantenimiento al igual que las tuberías, válvulas y bombas deben estar en buen estado para evitar obstrucciones.

Las marmitas deben poseer un enchaquetado completo para poder transferir el suficiente calor a la mezcla y lograr la pasteurización, evitando así la falla de no alcanzar las propiedades de los productos y su conservación.

Una vez expuesto lo anterior, se observó que la pérdida de energía se debe mayoritariamente al intercambio térmico con el ambiente debido a la falta de aislamiento en las tuberías y equipos e incluso unos equipos se pueden considerar como innecesarios; también ocurre que no se han realizado estudios del funcionamiento de los equipos que componen la línea de producción.

Analizando lo anterior, la maquinaria, debido al diseño de algunos equipos existentes y su funcionalidad, representa un factor para ser tomado en cuenta para el desarrollo del trabajo.

- **Método**

En esta categoría se analiza el procedimiento o método utilizado para trasladar, almacenar, agregar y envasar los materiales del proceso, es un factor relevante y controlable, ya que el suministro de los materiales necesarios en el tiempo preciso, así como la maximización del espacio y la minimización de pasos de manejo de materiales, pueden generar mejoras en las operaciones de producción, lo cual traería consigo reducción de costos y mano de obra, mayor seguridad, incremento en la producción, reducción de desperdicios, mejora en los servicios a los clientes y mayor productividad.

Debido a la alta automatización de la línea de producción de colados, las pérdidas de energía debido al método son pequeñas, así que no se tomó en cuenta en el desarrollo de este trabajo.

- **Medición**

Es todo lo relacionado a la toma de datos e inspección de los equipos empleados para el logro de la producción. Es de gran relevancia, ya que si se controlan todos los factores influyentes, como temperatura, presión, cantidad de materia, viscosidad, se podría garantizar una máxima efectividad del proceso, cumpliendo con las exigencias o requerimientos de la empresa.

Aunque es importante, la medición no se tomó en cuenta, por representar una pequeña etapa del proceso, que no requiere de un arreglo inmediato, debido a que existen métodos no tan técnicos de análisis de esos factores en dicha empresa.

4.2.3. Elaboración de un diagrama causa y efecto depurado.

Haciendo uso de las herramientas desarrolladas anteriormente, se refinó un nuevo diagrama causa-efecto que hace énfasis en las variables que afectan en mayor medida las pérdidas de energía en el proceso de producción de colados. La figura 4.3 muestra el diagrama causa - efecto depurado.

Luego de haber realizado el análisis a cada una de las categorías o factores del diagrama causa-efecto general, se eliminan los aspectos que no representan gran influencia o no se puedan manipular, siendo estas categorías las de materiales, medición, método, medio ambiente y mano de obra.

Al observar la figura 4.3, el diagrama causa-efecto depurado, refleja que las causas potenciales que contribuyen en mayor medida a la manifestación del efecto no deseado son las pertenecientes a la categoría de maquinaria.

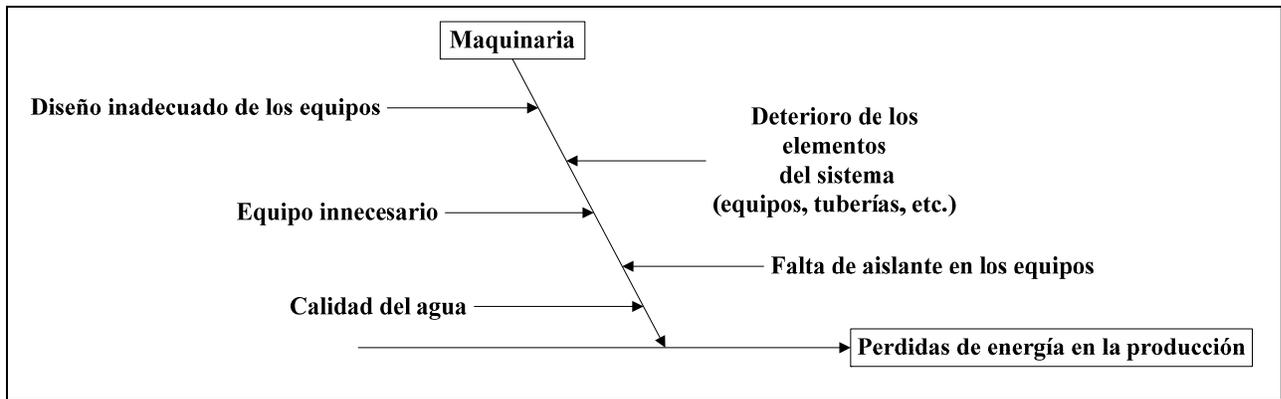


Figura 4.3 Diagrama causa – efecto depurado de las variables que influyen en las pérdidas de energía en la producción de colados.

4.2.4. Determinación de las variables que afectan en mayor medida la pérdida de energía de la línea de producción de colados.

Con la finalidad de proporcionar un análisis cuantitativo de las causas obtenidas, se determinan los puntos críticos. Es de señalar que esta valoración se obtiene a través de consultas con el personal técnico de planta y especializado en el área.

4.2.4.1. Elaboración del diagrama de Pareto.

De acuerdo a los resultados que se pueden observar de la tabla 4.8 se puede inferir como una primera aproximación en la comprensión del problema, que los valores críticos que más afectan son el diseño inadecuado de los equipos y la falta de aislante en los equipos.

Ahora bien, este análisis requiere de nuevos elementos que precisen más las causas que pudieran estar incidiendo de manera directa en el problema objeto de estudio. Para el levantamiento de dicho diagrama se utilizó el porcentaje y la sumatoria obtenidos en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Matriz de causa – efecto para identificar las causas más significativas en el proceso que producen pérdidas de energía.

	Causas	P1	P2	P3	Sumatoria	%
1	Diseño inadecuado de los equipos	10	10	10	30	21,428571
2	Falta de aislante en los equipos	10	10	10	30	21,428571
3	Equipos innecesarios	10	10	10	30	21,428571
4	Deterioro del los elementos del sistema	2	2	4	8	5,7142857
5	Inadecuada inspección del proceso	1	4	2	7	5
6	Inexistencia de manuales	1	2	4	7	5
7	Calidad del agua	2	3	1	6	4,2857143
8	Mantenimiento insuficiente	1	3	1	5	3,5714286
9	Inexistencia de control estadístico	1	3	1	5	3,5714286
10	Carencia de equipos de medición	1	1	1	3	2,1428571
11	Capacitación	1	1	1	3	2,1428571
12	Habilidad	1	1	1	3	2,1428571
13	Incentivos	1	1	1	3	2,1428571
Total					140	100

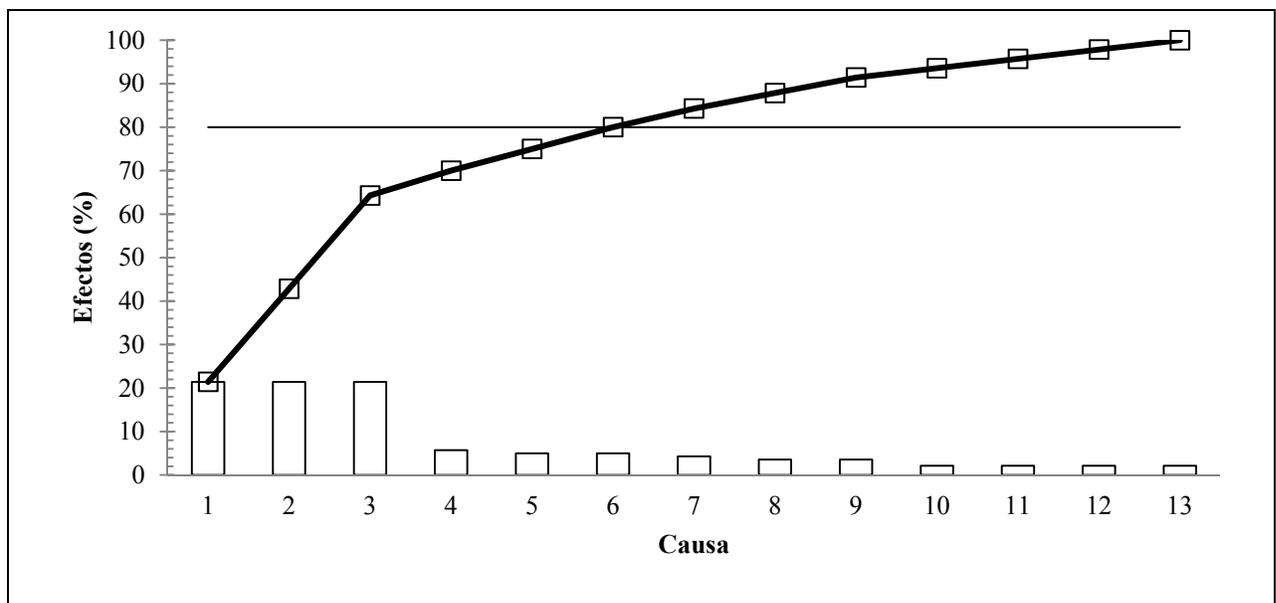


Figura 4.4 Diagrama de Pareto para causas que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.

4.2.4.2. Selección de las variables que más afectan las pérdidas de energía en la producción de colados.

El diagrama de Pareto en la figura 4.4 ayudó a identificar y establecer las causas de primer nivel de alta prioridad que debían abordarse para solventar la mayor parte del problema en estudio. Estas causas fueron el diseño inadecuado del equipo, la falta de aislante en el equipo, los equipos innecesarios, el deterioro de los elementos del sistema, la inadecuada inspección del proceso y la inexistencia de manuales.

Tomando en cuenta la definición de Pareto antes mencionada, el número de causas que deben abordarse, las cuales representan un 46% de las existentes en el problema, no concuerda con lo establecido con la definición que habla sólo del 20%, más esta situación no representa ningún error, debido a que estos tipos de análisis son cualitativos, por lo que no existe una precisión o exactitud en los resultados. Son herramientas que ayudan a ir desglosando los puntos más importantes de un problema.

4.3 Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.

Este objetivo consistió en hacer propuestas que proporcionen reducciones en el gasto de energía del proceso de manufactura de colados.

4.3.1. Realización de una tormenta de ideas donde se propongan diferentes alternativas para reducir las pérdidas de energía en el proceso de manufactura.

El evaluar la situación a través de una tormenta de ideas permitió generar posibles soluciones respecto a las pérdidas de energía (Ver figura 4.5).

- Colocar aislante a las tuberías que transporten fluidos calientes: reduciría el intercambio térmico al ambiente debido a que la conductividad térmica de las tuberías es muy alta.

- Colocar aislante térmico al intercambiador de calor, ya que el fluido que pasa por la coraza tiene una alta temperatura y debido a la alta conductividad térmica de la coraza se pierde una cantidad considerable de energía al ambiente. También se propuso aislar térmicamente las marmitas por las razones que mencionadas para el intercambiador de calor y las tuberías de fluidos calientes.
- Evaluar el funcionamiento del túnel de enfriamiento, desconocido hasta ahora, con la intención de detectar alguna falla que esté produciendo alguna pérdida de energía.
- Eliminar el intercambiador de calor y que se deje solo la función de reciclo por una válvula automática de dos vías, ya que la principal función del intercambiador es la de calentar el colado proveniente de las marmitas para asegurar que se encuentre en una temperatura entre 70°C y 80°C; de no estar el colado en el rango antes mencionado, se recircula hacia las marmitas.
- Cambiar el túnel de enfriamiento por uno que permita manipular las diferentes variables que tienen que ver con su función de enfriar frascos.
- Cambiar las marmitas por unas cuyo diseño permita un funcionamiento más eficiente.

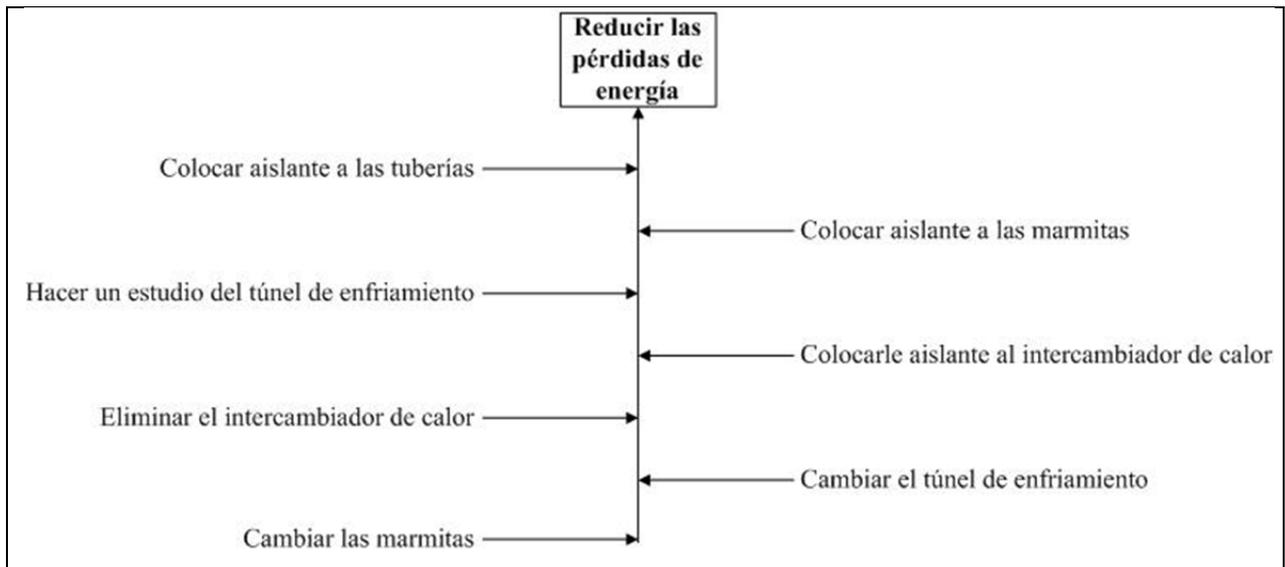


Figura 4.5 Tormenta de ideas de las alternativas propuestas para reducir las pérdidas de energía en el proceso de manufactura.

4.3.2. Revisión bibliográfica de los aspectos técnicos referentes a las alternativas propuestas.

4.3.2.1 Aislantes.

Para el aislamiento de tuberías se tienen “cañuelas aislantes”, que son:

Lana mineral de roca aglomerada y moldeada en forma cilíndrica en dos medias cañas que se ajustan perfectamente al tubo.

Las cañuelas están disponibles sin recubrimiento y recubiertas en una de sus caras con foil de aluminio reforzado. Norma ASTM C547 Clase 2. (ASTM Standard C547, 2000).

Se especifica para aislar térmicamente tuberías calientes con diámetros nominales desde ½ hasta 8 pulgadas.

Conductividad térmica: $0,11 \frac{W}{m K}$ (JP calderas, 2010)

Para el aislamiento de las marmitas y el intercambiador de calor se dispone de cemento aislante de fraguado hidráulico, resultante de la mezcla de proporciones controladas de fibras de lana mineral de roca con cargas minerales y refractarias especialmente formuladas. Norma ASTM C195. (ASTM Standard C195, 2000)

Se usa como aislante térmico y para terminado de equipos, tuberías, bridas, juntas, etc. Además, una vez seco, sirve como barrera protectora dura e impermeable, que previene el daño mecánico del aislamiento y actúa contra la corrosión generada por el agua y otros agentes.

Conductividad térmica: $0,11 \frac{W}{m K}$ (JP calderas, 2010)

4.3.2.2 Marmitas.

La marmita propuesta es fabricada por la empresa “Acerinox y Aminox”.

- La mayor parte del calor se utiliza para el cocimiento, además son fáciles de limpiar.
- Al no ser a fuego directo evita que los alimentos se quemen o se peguen excesivamente.
- Se podrá preparar gran variedad de guisados en volúmenes elevados.
- Tiene una superficie de calentamiento más amplia que una olla normal.
- Puede ser fija o de volteo.
- Fabricadas de acero inoxidable tipo AISI-304, AISI-316 ó AISI-316 L.
- Con chaqueta para calentar.
- Diversos tipos de descarga.
- Con aislamiento térmico.
- Termómetros
- Controles de velocidad de los agitadores.

(Acerinox y Aminox, 2010)

4.3.2.3 Túnel de enfriamiento.

El túnel de enfriamiento tiene las siguientes características:

- No usa un ciclo de refrigeración para que el agua reciclada se encuentre a bajas temperaturas.
- En su lugar funciona solo con una torre de enfriamiento.
- Para elevar el coeficiente convectivo tiene ventiladores en el túnel para aumentar la transferencia de calor.

4.3.3. Desarrollo de las alternativas propuestas aplicando los respectivos modelos matemáticos.

4.3.3.1 Estudio del túnel de enfriamiento.

Para hacer el estudio se deben calcular las propiedades del colado envasado y se debe calcular también el coeficiente convectivo del túnel para luego poder realizar los cálculos correspondientes a su funcionamiento.

4.3.3.1.1. Cálculo de la difusividad térmica.

Se calcula la difusividad mediante un calentamiento, el cual se estudia como una transferencia de calor en estado no estacionario. Se calienta un envase de colado en un baño termostático, después de un tiempo de diez minutos se inicia la medición de la temperatura del centro geométrico del envase en función del tiempo. Debe existir una elevada agitación en el baño termostático para que los valores del número de Biot tiendan al infinito.

Para cada resultado se calcula la temperatura adimensional Y_{cf} .

$$Y_{cf} = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} \quad 4.1$$

Donde:

- T_{∞} : Temperatura del baño.
- T : Temperatura medida en cada instante en un punto del cilindro finito.
- T_0 : Temperatura inicial del colado.

El resultado de este experimento se muestra en la figura 4.6 y la tabla 4.9

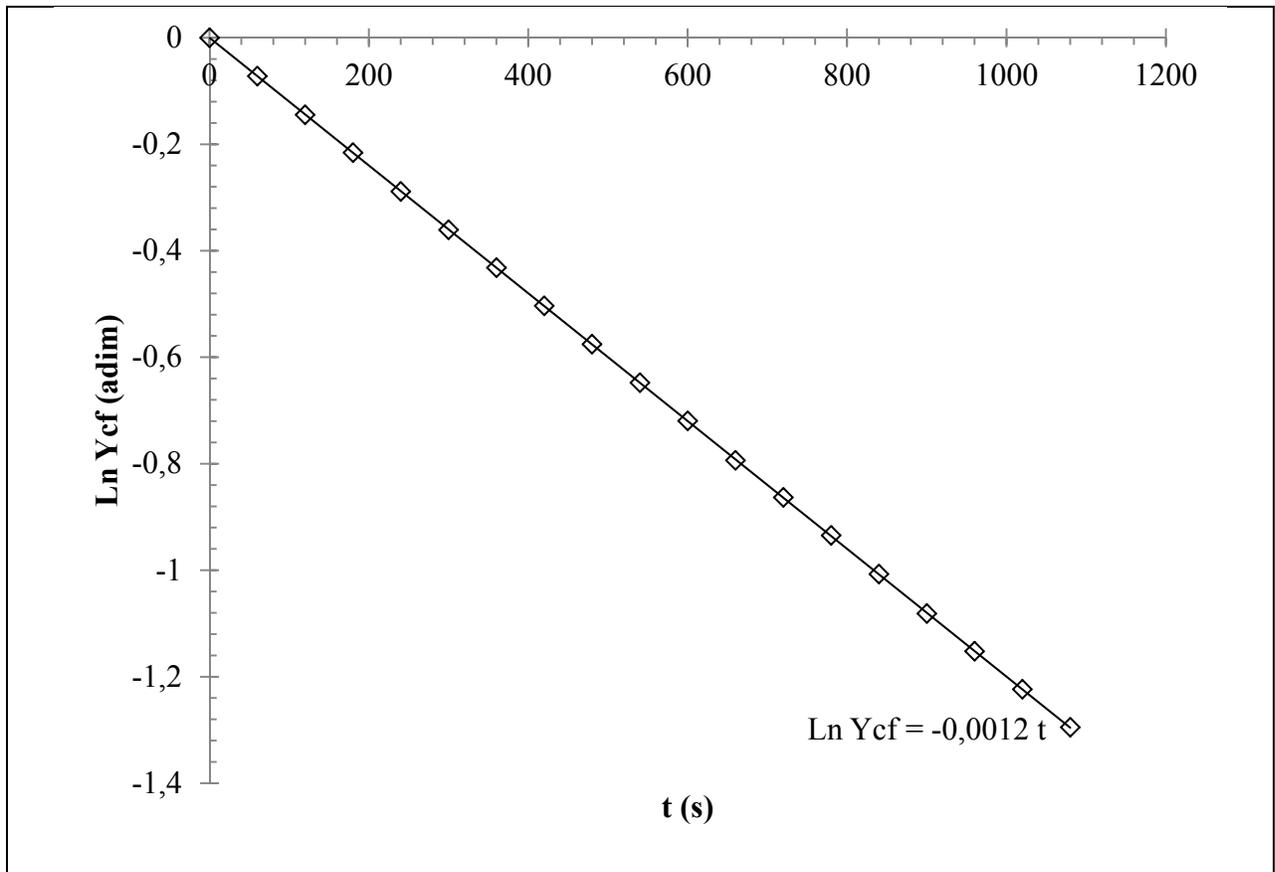


Figura 4.6 Gráfico $\ln Y_{cf} = f(t)$ usado para el cálculo de la difusividad térmica del colado.

Luego según la siguiente ecuación: (Ibarz Ribas y col, 2000)

$$\ln Y_{cf} = \ln 2,040 - \left[\left(\frac{1,017}{a^2} + \frac{2,512}{r_c^2} \right) \alpha \right] t \quad 4.2$$

Representando $\ln Y_{cf} = f(t)$, debe aparecer una recta de:

- Ordenada en el origen = $\ln 2,040$.
- Pendiente = $-\left(\frac{2,512}{r_c^2} + \frac{1,071}{a^2} \right) \alpha$

De esta manera se puede obtener el valor de la difusividad de la pendiente del gráfico.

Tabla 4.9 Resultados del experimento para calcular la difusividad térmica del colado.

t (s)	T (°C)	Y _{cf} (adim)	Ln Y _{cf} (adim)
0	29,0	1	0
60	33,8	0,93043478	-0,07210329
120	38,3	0,86521739	-0,14477448
180	42,4	0,8057971	-0,2159233
240	46,3	0,74927536	-0,28864872
300	49,9	0,69710145	-0,36082433
360	53,2	0,64927536	-0,43189837
420	56,3	0,60434783	-0,50360538
480	59,2	0,56231884	-0,57568626
540	61,9	0,52318841	-0,64781364
600	64,4	0,48695652	-0,71958044
660	66,8	0,45217391	-0,79368841
720	68,9	0,42173913	-0,86336833
780	70,9	0,39275362	-0,93457278
840	72,8	0,36521739	-1,00726251
900	74,6	0,33913043	-1,08137048
960	76,2	0,31594203	-1,15219653
1020	77,7	0,2942029	-1,22348562
1080	79,1	0,27391304	-1,29494458
∞	98,0	0	-

En el gráfico la pendiente de $\ln Y_{cf} = f(t)$ fue de -0,0012. Al despejar la difusividad con $r_c = 2,050\text{cm}$ y $a = 2,515\text{cm}$, da como resultado $\alpha = 1,56441E - 7 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

Este valor se desvía de los valores predichos por Dickerson (1969) en la ecuación 4.3, donde se relaciona la difusividad térmica con la fracción de agua que contiene el alimento y la difusividad del agua a la misma temperatura, en un 2,64%.

$$\alpha = 0,053 + (\alpha_w - 0,053)X_w \quad 4.3$$

Donde:

- α : difusividad en (cm^2/min).
- α_w : difusividad del agua en (cm^2/min).

- X_w : fracción másica de agua en el alimento (adim).

$$\alpha = 0,09145 \frac{cm^2}{min}$$

$$\alpha = 1,5241E - 7 \frac{m^2}{s}$$

4.3.3.1.2. Cálculo de la densidad.

Se calcula con un picnómetro previamente calibrado con agua destilada. La densidad vendrá dada por la fórmula:

$$\rho = \frac{p_t - p_v}{p_a - p_v} \quad 4.4$$

En la que:

- p_t : peso del picnómetro lleno de colado.
- p_v : peso del picnómetro vacío.
- p_a : peso del picnómetro lleno de agua destilada.

(Ibarz Ribas y col, 2000)

Al calcular la densidad dio como resultado $1083,8 \frac{kg}{m^3}$.

4.3.3.1.3. Cálculo de la capacidad calórica.

Para determinar la constante del calorímetro K' , se introducen 300 g de agua destilada a una temperatura cualquiera y se mide la temperatura de estabilización.

$$K' = MC_e'(T - T_f) \quad 4.5$$

Donde:

- T : Temperatura inicial del agua.
- T_f : Temperatura final del agua.
- M : Masa de agua.
- C_e' : Calor específico del agua.

(Ibarz Ribas y col, 2000)

Usando la ecuación 4.5 y realizando el experimento se obtuvieron los siguientes resultados (ver tabla 4.10):

Tabla 4.10 Resultados de la experiencia para calcular la constante del calorímetro.

M (g)	Ma (mol)	T (°C)	T _f (°C)	Ce' (J/mol K)	K (J)	K (kJ)
302,0	16,78	45,0	45,1	75,3	-126,369514	-0,126369514

Luego de tener el valor de la constante del calorímetro, se introducen en este una cantidad de:

- 150 g de colado a temperatura ambiente.
- 150 g de agua destilada a 50°C.

Luego se agita y se anota la temperatura de estabilización.

El calor específico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_t C_e (T_t - T_e) = M C_e' (T_e - T_a) + K' \quad 4.6$$

Donde:

- M_t : Masa de colado.
- M : Masa de agua.
- C_e : Calor específico del colado.
- C'_e : Calor específico del agua.
- K' : Constante del calorímetro.
- T_e : Temperatura de equilibrio.
- T_a : Temperatura ambiente del agua.
- T_t : Temperatura inicial del colado.

(Ibarz Ribas y col, 2000)

Al despejar C_e y sustituir los valores de la experiencia se obtiene el valor del calor específico que se muestra en la tabla 4.11:

Tabla 4.11 Resultados de la experiencia para calcular el calor específico del colado.

Mt (kg)	Tt (°C)	M (kg)	Ta (°C)	Te (°C)	Ce' (kJ/kg*K)	Ce (kJ/kg*K)	Ce (J/kg*K)
0,151	26,0	0,148	74.0	50,5	4,18	3,96804588	3968,04588

El valor calculado del calor específico del colado usando un calorímetro fue de $3,96805 \frac{kJ}{kgK}$.

Este valor se desvía de los valores predichos por Dickerson (1969) en la ecuación 4.7, donde se relaciona el calor específico con la fracción de agua que contiene el alimento, en un 0,99% por lo que los resultados de la experiencia son aceptables.

$$Cp = 1,67 + (2,51X_m) = 3,929 \frac{kJ}{kgK} \quad 4.7$$

Donde:

- C_p : calor específico en (kJ/kgK) .
- X_w : fracción másica de agua en el alimento (adim).

4.3.3.1.4. Cálculo de la conductividad térmica.

Con los valores obtenidos anteriormente de difusividad, densidad y calor específico se calcula la conductividad con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad 4.8$$

Donde:

- k : Conductividad térmica.
- ρ : Densidad.
- C_p : Calor específico.

(Ibarz Ribas y col, 2000)

El valor de la conductividad calculado fue de $0,6736 \frac{W}{mK}$.

4.3.3.1.5. Determinación de coeficientes de transmisión de calor por convección.

Cuando un objeto de pequeñas dimensiones y conductividad térmica elevada, a una temperatura inicial T_0 , se coloca inmerso en un fluido que se halla a una temperatura externa T_e , distinta a la del objeto, existe una transmisión de calor desde o hacia el mismo a través del fluido externo.

Se determina el valor del coeficiente convectivo usando la ecuación 4.9

$$\ln\left(\frac{T-T_e}{T_0-T_e}\right) = -\left(\frac{hA}{\rho C_p V}\right)t \quad 4.9$$

El término logarítmico recibe el nombre de temperatura relativa (*RT*). Al representar la variación de la relación de temperatura frente al tiempo se obtiene una recta que pasa por el origen, a partir de cuya pendiente es posible obtener el valor del coeficiente externo de transmisión de calor por convección, si se conocen las dimensiones y propiedades térmicas del material del que está construido el objeto. (Ibarz Ribas y col, 2000)

En la realización de este experimento no fue posible construir la recta del gráfico con más de dos puntos debido a la carencia de equipos de medición adecuados para hacer un seguimiento de la temperatura del objeto en estudio, el cual solo se podía hacer una medición a la entrada y otra a la salida del túnel.

Por esta razón se realizó una medición de temperatura en un tiempo de 0 segundos y de 10 segundos ya que a ese tiempo el objeto en estudio aun no alcanza la temperatura del medio, esta experiencia se realizó 6 veces para tener un promedio ya que solo se va a disponer de dos puntos para construir la recta, los resultados de este experimento se muestran en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Temperatura a los 10 segundos del objeto de aluminio en el túnel de enfriamiento.

	1	2	3	4	5	6	Promedio
T₀	90	90	90	90	90	90	90
T_f (10 s)	37,5	37,6	37,4	37,4	37,3	37,4	37,43
T_∞	29	29	29	29	29	29	29

En la figura 4.7 se muestra la gráfica usada para el cálculo del coeficiente convectivo mediante la pendiente de Ln(*RT*) vs *t*.

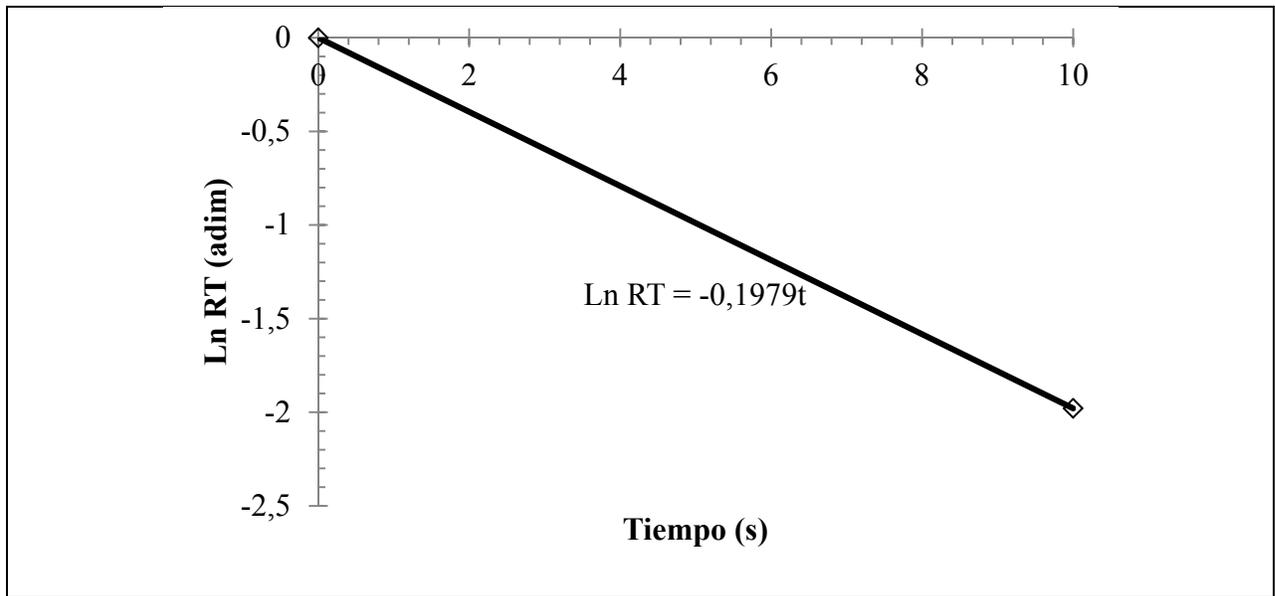


Figura 4.7 Gráfica de Ln(RT) vs. Tiempo del objeto de aluminio en el túnel de enfriamiento.

El coeficiente convectivo de la primera etapa del túnel donde se usa agua a temperatura ambiente fue de $200 \frac{W}{m^2K}$.

4.3.3.1.6. Predicción de la temperatura final de los frascos usando solamente agua a temperatura ambiente.

Una vez calculadas las propiedades y el coeficiente convectivo del túnel de enfriamiento se puede hacer una predicción de la temperatura final de los frascos, usando únicamente agua a temperatura ambiente, usando la metodología que se muestra en la figura 3.4, lo cual dio como resultado:

Al sustituir las propiedades en la ecuación 4.10 se obtiene el valor del número Biot para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Bi = \frac{h Lc}{k} \tag{4.10}$$

Luego con el valor del Biot extraen de la tabla 2.2 los valores de $\zeta_1=1,38656\text{rad}$ y $C_1=1,2550$ para la pared plana y $\zeta_1=2,0529\text{rad}$ y $C_1=1,5267$ para el cilindro infinito.

Luego con la ecuación 4.11 se obtiene el valor de número de Fourier para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Fo = \frac{\alpha t}{Lc^2} \quad 4.11$$

Luego al sustituir los valores en la ecuación 4.12:

$$\theta_0^* = C_1 e^{(\zeta_1^2 Fo)} \quad 4.12$$

Para finalizar se sustituyen los valores en la ecuación 2.58:

$$T_{centro} = 302K + [0,709342 \times 0,232352(350K - 302K)] = 309,9K$$

$$T_{pared} = 302K + [0,709342 \times 0,232352 \times J_0(2,0529)(350K - 302K)] = 303,5K$$

El resultado final es de 37°C en el centro y de 31°C en la altura media lateral del frasco que es una temperatura aceptable para la manipulación de los colados envasados aunque sea 10°C mas alta que la temperatura en la altura media lateral del frasco usando agua a 4°C .

La cantidad de energía que se ahorra al usar el agua a temperatura ambiente en toda la longitud del túnel es la energía que se usa para enfriar el agua a 4°C la cual es de $95,424\text{kWh/día}$.

4.3.3.2. Colocar aislante a las tuberías.

Todos los cálculos de la cantidad de calor que se pierde al ambiente tanto en tuberías como en las marmitas se basan en la ecuación 4.13.

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_i} \quad 4.13$$

La pérdida de calor que se produce por las tuberías se puede calcular usando la metodología mostrada en la figura 3.3. Para hacer los cálculos correspondientes se utilizaron las propiedades proporcionadas por la bibliografía.

El calor perdido por las tuberías de vapor es de 608,89 W y el calor perdido por las tuberías que transportan colado es de 1049,07 W, el total de calor perdido al ambiente es de 1657,96 W.

Se realizaron los cálculos correspondientes a aislante de 2,5 pulgadas de espesor ya que se dispone del espacio necesario, que es lo mismo que 6,35 cm, lo que resulto en una pérdida de calor al ambiente de 390,41 W y 340,70 W para las tuberías de vapor y de colados respectivamente dando un total de 681,11 W, lo que resulta en un ahorro de 976,85 W que ya no se estarían perdiendo al ambiente, dando un porcentaje de reducción de gasto de energía de 58,9%. Entre ambas representan un ahorro de 103,9 mL de combustible por hora.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran la pérdida de energía al ambiente de las tuberías de vapor y de colado respectivamente dependiendo del espesor del aislante de lana mineral.

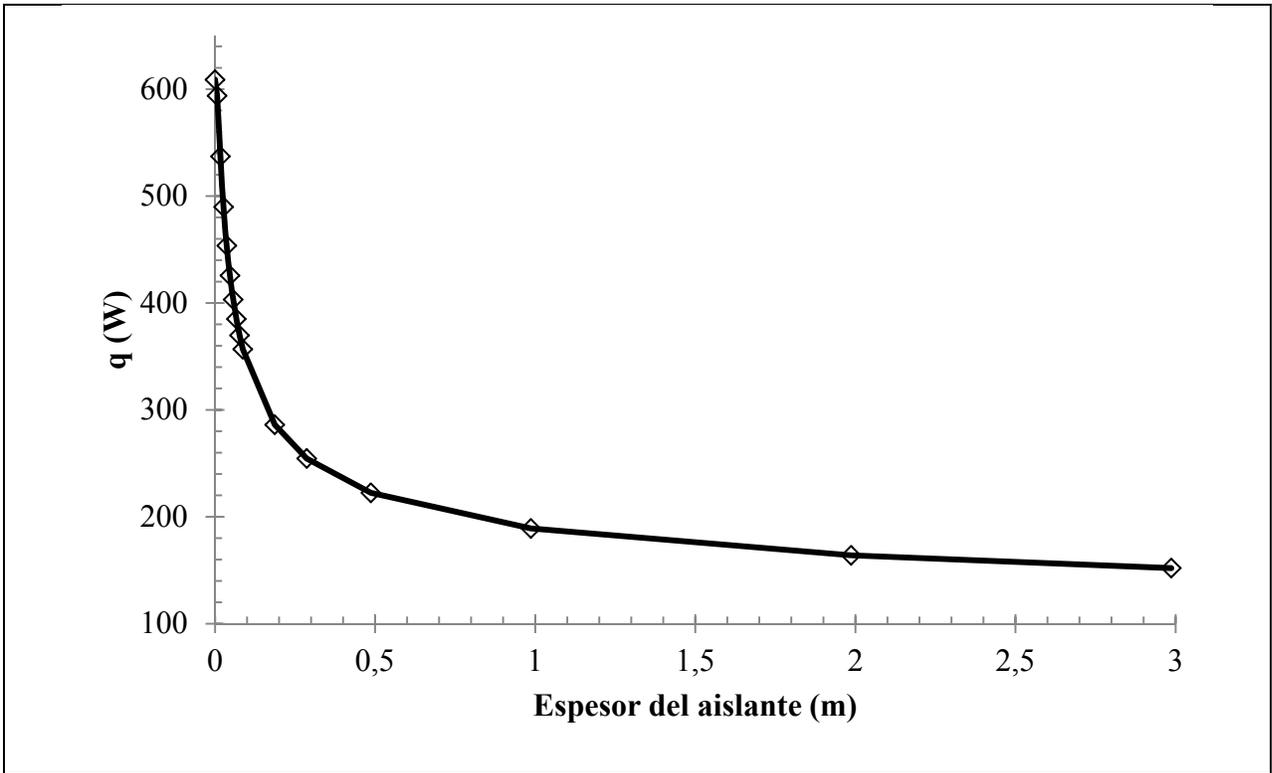


Figura 4.8 Pérdida de calor al ambiente en las tuberías de vapor.

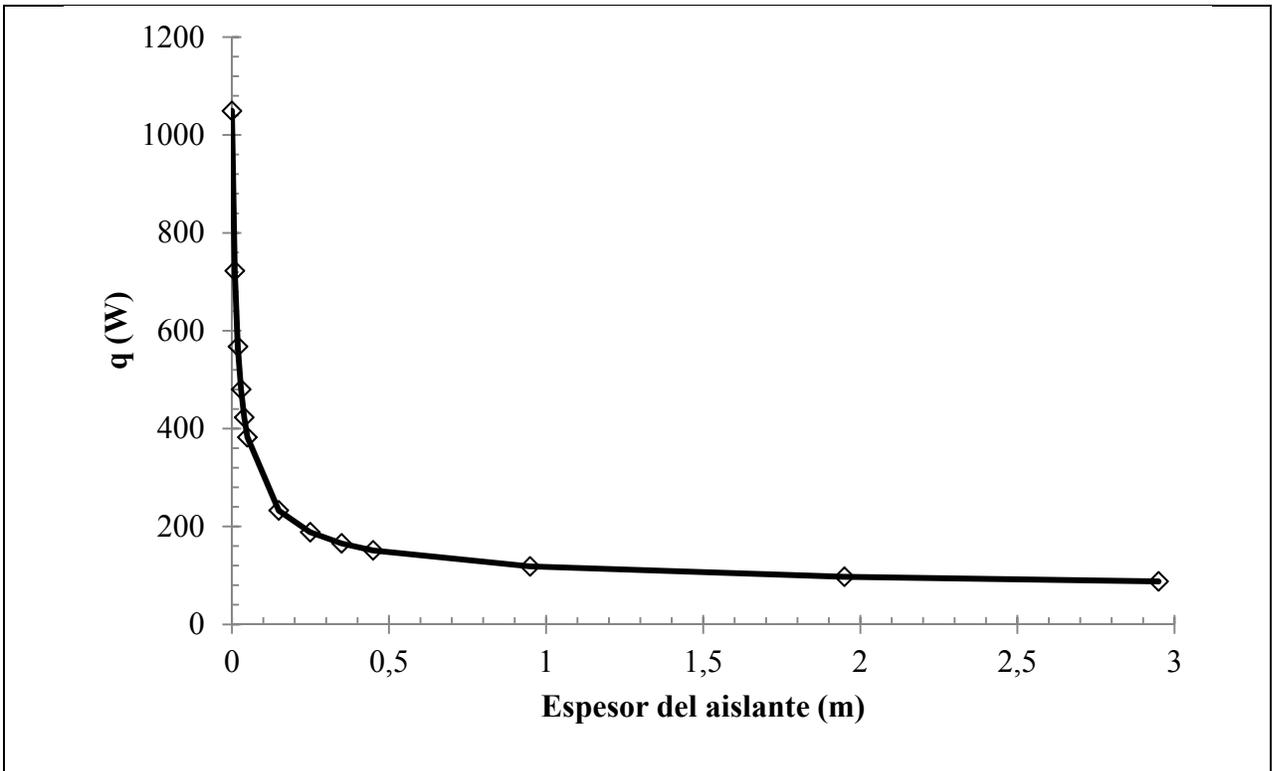


Figura 4.9 Pérdida de calor al ambiente en las tuberías de colado.

4.3.3.3. Colocar aislante a las marmitas.

La pérdida de calor que se produce por las marmitas se puede calcular usando la metodología mostrada en la figura 3.3. Para hacer los cálculos correspondientes se usaran las propiedades proporcionadas por la bibliografía.

El calor perdido por las marmitas es de 1770,73 W y el calor que se perderá al ambiente después de la instalación del aislante, de 4 cm de espesor ya que ese es el espacio disponible, será de 580,79 W, logrando una reducción de gasto de energía de 1189,94 W dando un porcentaje de reducción de gasto de energía de 67,21%. Esto representa un ahorro de 126,57 mL de combustible por hora.

La figura 4.10 muestra la pérdida de energía al ambiente de las marmitas dependiendo del espesor del aislante de lana mineral.

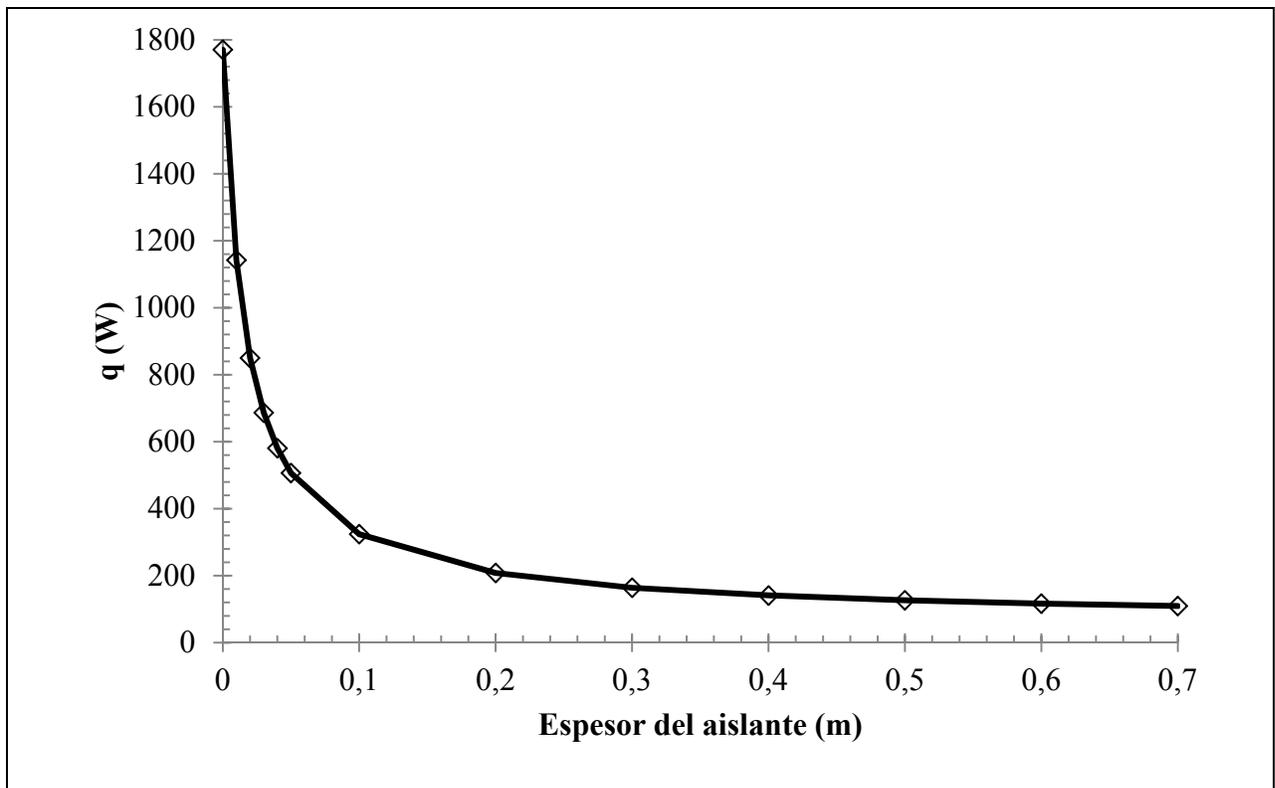


Figura 4.10 Pérdida de calor al ambiente en las marmitas.

4.3.3.4. Colocar aislante al intercambiador de calor.

La pérdida de calor que se produce por el intercambiador de calor se puede calcular usando la metodología mostrada en la figura 3.3. Para hacer los cálculos correspondientes se utilizaron las propiedades proporcionadas por la bibliografía.

El calor perdido por el intercambiador de calor es de 499,85 W y el calor que se perderá al ambiente después de la instalación del aislante, de 4 cm de espesor ya que ese es el espacio disponible, será de 177,31 W, logrando una reducción de gasto de energía de 322,54 W dando un porcentaje de reducción de gasto de energía de 64,53%. Esto representa un ahorro de 34,31 mL de combustible por hora.

La figura 4.11 muestra la pérdida de energía al ambiente del intercambiador de calor dependiendo del espesor del aislante de lana mineral.

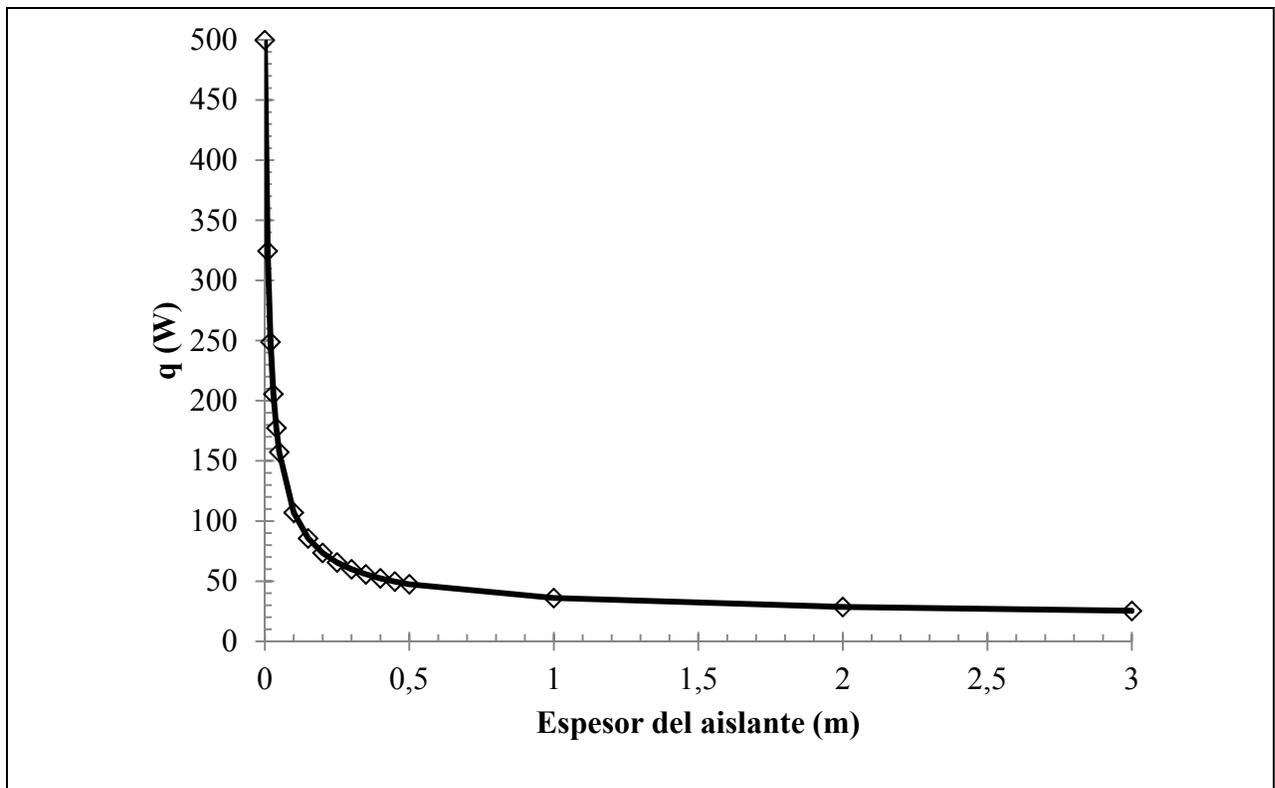


Figura 4.11 Pérdida de calor al ambiente en el intercambiador de calor

4.3.3.5. Eliminar el intercambiador de calor.

Eliminar el intercambiador de calor de la línea y dejar solamente el controlador del reciclo del colado resultaría en un ahorro de energía de 499,85 W que es el calor que se pierde al ambiente a través de la superficie del intercambiador. Esto representa un ahorro de 53,17 mL de combustible por hora.

4.3.3.6. Cambiar el túnel de enfriamiento.

El nuevo túnel de enfriamiento propuesto basa su ahorro de energía en no usar un ciclo de refrigeración para que el agua reciclada se encuentre a bajas temperaturas y a diferencia del túnel actual usa ocho ventiladores de una potencia de $1/6$ hp cada uno para aumentar el intercambio térmico de los frascos al ambiente.

El ahorro de energía de este túnel es de 89,0624 kWh/día.

4.3.3.7 Cambiar las marmitas.

La nueva marmita propuesta basa su ahorro de energía en poseer un aislamiento de lana mineral de 5 cm de espesor.

El ahorro de energía que conlleva el uso de esta marmita es de 1264,14 W. Esto representa un ahorro de 134,46 mL de combustible por hora.

4.4 Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.

Para lograr elegir la alternativa tecnológica más adecuada a los requerimientos de la planta, se plantearon distintos sistemas que puedan solucionar el problema de pérdidas de energía de los equipos, para luego a través de una matriz de selección, adoptar la mejor alternativa para tal fin.

4.4.1. Establecimiento de un criterio de ponderación para las alternativas propuestas.

Los criterios (ver tabla 4.13) fueron determinados tomando en cuenta los factores más importantes al momento de desarrollar cualquiera de las alternativas propuestas, los cuales se definen a continuación:

- **Menor pérdida de energía.**

Este factor se refiere al nivel de energía que se pierde en el proceso con la alternativa. Mientras sea menor la energía perdida, mayor será el ahorro de combustible y por lo tanto mayor el ahorro de dinero por parte de la empresa, lo cual también reducirá el tiempo de recuperación de la inversión inicial.

- **Inversión inicial.**

Este criterio se refiere al costo que debe incurrir la empresa para proceder a instalar la alternativa que se seleccione.

- **Costos de operación.**

Este factor representa aquellos desembolsos que se requieren para que el sistema al colocarlo en marcha continúe operando normalmente. Estos costos incluyen materia prima, mano de obra, energía o combustible, servicios, mantenimiento, entre otros.

- **Requerimiento de espacio en la planta.**

El espacio físico juega un papel importante a la hora de realizar la selección, ya que se está desarrollando en un área operativa ya construida dentro de la empresa, por lo cual se debe limitar la utilización de grandes extensiones de terreno para la implementación del sistema a seleccionar, donde el sistema debe proporcionar una buena calidad en la seguridad e higiene y en la ergonomía.

- **Mantenimiento.**

Es un servicio que agrupa una serie de actividades cuya ejecución permite alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos, máquinas, construcciones civiles, instalaciones. Está relacionado con la facilidad de mantener en buenas condiciones los equipos del proceso.

- **Seguridad.**

Está relacionado muy estrechamente en la prevención de accidentes y lesiones en el trabajador con el buen funcionamiento de la maquinaria.

Tabla 4.13 Ponderación de los criterios a utilizar para construir la matriz de selección.

Criterios	Ponderación
Menor pérdida de energía	25
Inversión inicial	20
Costos operacionales	20
Requerimientos de espacio en la planta	20
Mantenimiento	10
Seguridad	5
Total	100

4.4.2. Comparación de las alternativas propuestas.

Una vez definidos los criterios de evaluación y su ponderación se procede a construir la matriz de selección (ver tabla 4.14).

Tabla 4.14 Matriz de selección.

Factores	Peso (%)	Alternativas													
		A		B		C		D		E		F		G	
		Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo
Menor pérdida de energía	25	2	0,4	3	0,6	1	0,2	5	1	1	0,2	5	1	3	0,6
Inversión inicial	20	2	0,4	4	0,8	4	0,8	5	1	5	1	1	0,2	1	0,2
Costos operacionales	20	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1
Requerimientos de espacio en la planta	20	4	0,8	4	0,8	4	0,8	5	1	5	1	5	1	5	1
Mantenimiento	10	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	3	0,6	3	0,6
Seguridad	5	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	3	0,6	5	1
Total	100	69		82		72		100		80		78		70	

- A: colocar aislante a las tuberías.
- B: colocar aislante a las marmitas.
- C: colocarle aislante al intercambiador de calor.
- D: usar solamente agua a temperatura ambiente en el túnel de enfriamiento.
- E: eliminar el intercambiador de calor.
- F: cambiar el túnel de enfriamiento.
- G: cambiar las marmitas.

4.4.3. Elección de la alternativa tecnológica que más se adecúe a las necesidades de la empresa.

Tomando en cuenta los resultados de la matriz de selección, se determinó que la alternativa más adecuada para lograr la reducción del gasto energético es **usar solamente agua a temperatura ambiente en el túnel de enfriamiento**, ya que obtuvo el mayor puntaje entre las demás alternativas propuestas; sin embargo, las opciones **colocar aislante a las tuberías** y **colocar aislante a las marmitas**, que no obtuvieron la puntuación más alta, también serán implementadas por petición de la procesadora de frutas.

4.5 Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas que se usarán para la mejora del proceso de producción de colados.

En esta etapa se determinó la factibilidad económica de la alternativa elegida, donde se toma en cuenta los costos de adquisición, instalación y mantenimientos de los equipos, así como también el consumo de energía, entre otros.

4.5.1. Estimación de los flujos monetarios actuales de la línea de producción de colados de procesadora de frutas.

Teniendo en cuenta de ante mano que el costo operacional será calculado antes y después de la implementación de la alternativa propuesta y aplicando la ecuación 3.1:

$$Cop_f - Cop_o = MP_f + Sa_f + Mant_f - MP_o - Sa_o - Mant_o \quad 4.14$$

Donde la variable Sa permanecerá igual antes y después de la implementación de la propuesta, entonces $Sa_f = Sa_o$:

$$Cop_f - Cop_o = MP_f - MP_o + Mant_f - Mant_o \quad 4.15$$

a) **Costos de materia prima:** costo asociados a la compra de materia prima: (Alvarado y col., 2005)

Debido a que el único cambio en el consumo de materia prima es el ahorro de combustible de la caldera y el ahorro en energía eléctrica, entonces usando la ecuación 3.2:

$$MP_f - MP_o = Cant. Comb \times Costo. Comb + Cant. kWh/dia \times Costo. kWh/dia \quad 4.16$$

Donde:

- Cant. Comb: cantidad de combustible empleado, (L).
- Costo Comb: costo del combustible, (Bs/L).
- Cant. kW: cantidad energía eléctrica empleada, (kWh/dia).
- Costo kW: costo de la energía eléctrica, (Bs/kWh/dia).

$$MP_f - MP_o = \left(-\frac{95,424kWh}{dia} \times \frac{Bs0,47}{kWh} \right) + \left(-\frac{(0,8312 + 1,0126 + 0,8312)L}{dia} \times \frac{Bs0,22}{L} \right)$$

$$MP_f - MP_o = -\frac{Bs44,85}{dia} - \frac{Bs0,59}{dia} = -\frac{Bs45,44}{dia}$$

$$MP_f - MP_o = -\frac{Bs45,26}{dia} \times \frac{300dia}{año} = -\frac{Bs13632}{año}$$

b) **Mantenimiento de los equipos:** costo asociado al mantenimiento de los equipos adquiridos. (Alvarado y col., 2005)

Debido a que el mantenimiento que influenciara en la factibilidad del proyecto será el de los nuevos equipos, entonces usando la ecuación 3.4:

$$Mant_f - Mant_o = 0,02 \times (CF_f - CF_o) \quad 4.17$$

c) Capital fijo.

Viene dado por el costo de los equipos, además del costo de instalación así como el costo de entrenamiento de los operadores y los imprevistos que puedan suceder durante la instalación, tanto el entrenamiento como los imprevistos representan el 5% del costo de los equipos adquiridos. El capital fijo se calcula utilizando la ecuación 3.8

d) Costo de los equipos a usar:

Se calcula usando la ecuación 3.5.

e) Costo de instalación de los equipos

Se emplea la relación donde es el 30% del costo de los equipos principales, para obtener el valor de la instalación de los mismos: se calcula utilizando la ecuación 3.6.

Entonces:

$$CF_f - CF_o = 1,4CE \quad 4.18$$

$$CF_f - CF_o = 1,4 \left(11Cañuela \times \frac{Bs\ 368}{Cañuela} + 11Cañuela \times \frac{Bs\ 253}{Cañuela} + 5saco \times \frac{Bs\ 95}{saco} \right)$$

$$CF_f - CF_o = Bs\ 10.228,40$$

$$Mant_f - Mant_o = 0,02 \times Bs10228,4 = \frac{Bs204,57}{año}$$

$$Cop_f - Cop_o = \frac{Bs0,68}{dia} - \frac{Bs45,44}{dia} = -\frac{Bs44,76}{dia}$$

4.5.2. Estimación del flujo monetario para llevar a cabo la propuesta.

La inversión inicial de la propuesta viene dada por la ecuación 3.7.

Entonces:

$$II = 1,4CE \times 1,15 = 1,61CE \quad 4.19$$

$$II = Bs\ 7306Bs \times 1,61 = Bs\ 11.762,66$$

4.5.3. Comparación de los flujos monetarios antes y después de la incorporación de la propuesta tecnológica, en caso de ser menor el flujo después de la incorporación determinar en cuanto tiempo se recuperará la inversión inicial.

Como se puede observar en la figura 4.12, usando la ecuación 3.11, la inversión inicial de Bs 11.762,66 será recuperada al transcurrirse 263 días de implementadas las propuestas de mejora de la línea de colados de la procesadora de frutas.

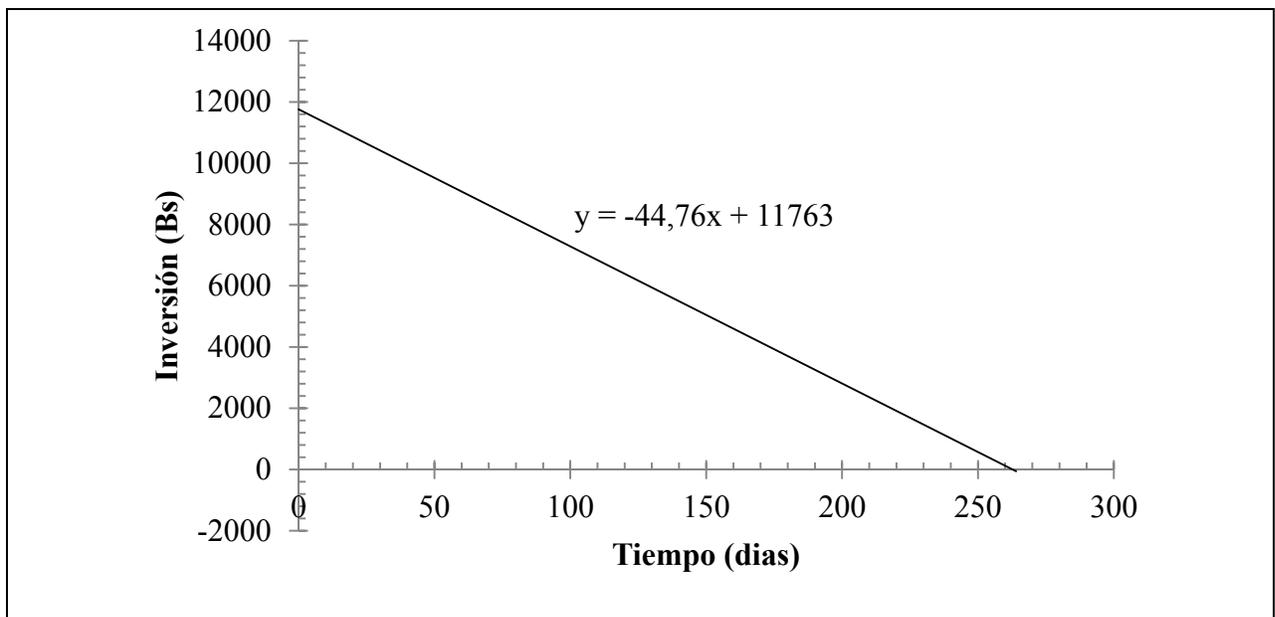


Figura 4.12 Tiempo de recuperación de la inversión inicial para llevar a cabo la propuesta de mejoramiento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se señalan las conclusiones más relevantes a las que se llegaron al culminar este trabajo especial de grado, así como también una serie de recomendaciones para cumplir a cabalidad con las alternativas propuestas.

Conclusiones.

- Las causas más resaltantes que provocan las mayores pérdidas de energía en el proceso de manufactura de colados, son: diseño inadecuado de los equipos, deterioro de los elementos del sistema, equipo innecesario, falta de aislante en los equipos, inadecuada inspección del proceso e inexistencia de manuales, siendo los más influyentes de estos el diseño inadecuado de los equipos y la falta de aislante en los equipos.
- Se propone la utilización de aislante térmico para reducir la pérdida de calor al ambiente en tuberías que transportan fluidos calientes y en las marmitas.
- El aislante térmico propuesto es lana mineral por su baja conductividad térmica además sirve como barrera protectora dura e impermeable, que previene el daño mecánico y actúa contra la corrosión generada por el agua y otros agentes.
- Se propone la eliminación del ciclo de refrigeración en la segunda etapa del túnel de enfriamiento y que en su lugar se use la torre de enfriamiento ya existente en ambas etapas, de esta manera se evita el consumo eléctrico del compresor.
- Con la propuesta se reduce la pérdida de calor al ambiente en 2166,79 W que es igual a 62403,6 kJ/día considerando que el uso de los equipos es de 8 horas diarias.

- El consumo energético del ciclo de refrigeración, usado para que el agua de enfriamiento del túnel tenga una temperatura de 4°C, es de 95,42 kWh/día, consumo que se puede ahorrar al ser implementada la propuesta.
- El tiempo de recuperación de la inversión inicial de la implementación de la propuesta es de 263 días, la inflación no se tomo en cuenta ya que los precios del combustible y de energía eléctrica no se ven afectados por la inflación en Venezuela debido a los subsidios del estado, por lo que el proyecto puede ser clasificado como proyecto rentable.

Recomendaciones.

- Colocar aislamiento térmico en todas las tuberías de la procesadora de frutas que no fueron estudiadas ya que este trabajo se limita a la sección de la línea de producción de colados.
- Reparar las fugas de vapor en la tapadora, para así evitar la pérdida de energía debida al mal funcionamiento de este equipo.
- Se sugiere la colocación o creación de carteleras y manuales de operación en donde se indiquen las variables a controlar en el proceso, así como los rangos permitidos de dicha variables y modo de operación de los equipos, para que puedan llevar un seguimiento de su comportamiento y estar alertas a cualquier variación significativa. Además se debe informar acerca de la prevención de accidentes que puedan ocurrir durante el desarrollo del proceso.
- Es recomendable llevar un historial del mantenimiento y parada de planta, así como también tener un archivo con las fichas técnicas de todos los equipos de la línea, con esta información se facilita la evaluación de un rediseño en el futuro.

APÉNDICE A

En este apartado se realizarán los cálculos típicos realizados en este trabajo que tienen relación con las propuestas antes planteadas.

A.1. Estudio del túnel de enfriamiento.

En el túnel de enfriamiento se presenta intercambio térmico en estado no estacionario. Para hacer el estudio se deben calcular las propiedades del colado envasado y se debe calcular también el coeficiente convectivo del túnel para luego poder realizar los cálculos correspondientes a su funcionamiento.

A.1.1. Cálculo de la difusividad térmica del colado.

Solo existe solución analítica o gráfica para las ecuaciones de intercambio térmico en régimen transitorio para los casos de geometrías sencillas:

- Lámina de largo y ancho infinitos y espesor finito.
- Cilindro de longitud infinita y radio finito.
- Esfera.

Los objetos con dimensiones finitas, como paralelepípedos y cilindros, etc., se deben considerar como intersección de dos o más cuerpos de dimensiones infinitas.

Así, un cilindro finito está formado por la intersección de un cilindro de longitud infinita y de radio finito, y de una lámina de caras paralelas, de espesor igual a la altura del cilindro y de largo y anchos infinitos.

La difusividad térmica se estima mediante un calentamiento de sólidos, donde se calienta un envase de colado y luego se deja enfriar en un baño termostático. Después de un tiempo de diez minutos se inicia la medición de la temperatura del centro geométrico del envase en función del

tiempo. Debe existir una elevada agitación en el baño termostático para que los valores del número de Biot tiendan al infinito. (Ibarz Ribas y col. 2000)

La regla de Newman relaciona las variables adimensionales de temperatura del cilindro finito con las de la lámina y el cilindro infinito de acuerdo con la expresión:

$$\theta_{cf} = \theta_{li} * \theta_{ci} \quad \text{A.1}$$

Donde:

- θ_{cf} : Temperatura adimensional en un punto del cilindro finito.
- θ_{li} : Temperatura adimensional en un punto de la lamina infinita.
- θ_{ci} : Temperatura adimensional en un punto del cilindro infinito.

Siendo:

$$\theta_{cf} = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} \quad \text{A.2}$$

Donde:

- T_{∞} = Temperatura ambiental.
- T_0 = Temperatura inicial.
- T = Temperatura del colado.

Se usan las ecuaciones analíticas aproximadas. Se sabe que una vez transcurrido el periodo de inducción (mayor a 10 minutos), se pueden despreciar los términos de la serie a partir del segundo. En el caso que, además, exista una agitación elevada, se puede considerar que el modulo de Biot tiende a valores muy altos. Por lo que las ecuaciones de la lámina infinita y el cilindro infinito, quedan reducidas a: (Ibarz Ribas y col, 2000)

$$\theta_{li} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} Fo_{li}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} x\right) \quad A.3$$

$$\theta_{ci} = 1,602 \exp(-5,784 X_{ci}) J_0(2,405 x) \quad A.4$$

Donde:

- θ_{ci} : Tiempo adimensional para el cilindro infinito.
- θ_{li} : Tiempo adimensional para la lámina infinita.
- x : Posición relativa
- J_0 : Función de Bessel de primera especie y orden cero

En este caso se efectúa la medida de la temperatura en el centro geométrico del cilindro, por lo que $r = 0$ y por tanto:

$$x = \frac{r}{r_m} = 0 \quad A.5$$

En la que:

- r : Es la longitud de transporte, es decir, la distancia desde el eje central del cilindro a un punto cualquiera, en el caso del cilindro, o distancia desde el plano central de la lámina a un punto cualquiera en el caso de la lámina, cuando el calentamiento se realiza por las dos caras.

Para el cilindro:

- $r_m = r_c$ (Radio del cilindro)

Para la lámina:

- $r_m = a$ (Mitad del espesor de la lámina; es decir, la mitad de la altura del frasco de colado)

Sabiendo además que:

$$\cos(0) = 1$$

$$J_0(0) = 1$$

Entonces quedaría:

$$\theta_{li} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} Fo_{li}\right) \quad \text{A.6}$$

$$\theta_{ci} = 1,602 \exp(-5,784 Fo_{ci}) \quad \text{A.7}$$

Sustituyendo en la regla de Newman:

$$\theta_{cf} = \frac{4}{\pi} 1,602 \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} Fo_{li} - 5,784 Fo_{ci}\right) \quad \text{A.8}$$

Con el tiempo adimensional:

$$Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2} \quad \text{A.9}$$

Siendo:

- α : Difusividad térmica:

$$Fo_{li} = \frac{\alpha t}{a^2} \quad \text{A.10}$$

$$Fo_{ci} = \frac{\alpha t}{r_c^2} \quad \text{A.11}$$

Sustituyendo:

$$\theta_{cf} = \frac{4}{\pi} 1,602 \exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha t}{4 a^2} - 5,784 \frac{\alpha t}{r_c^2}\right) \quad \text{A.12}$$

Tomando logaritmos neperianos y reagrupando términos:

$$\ln \theta_{cf} = \ln 2,040 - \left[\left(\frac{1,017}{a^2} + \frac{2,512}{r_c^2}\right) \alpha\right] t \quad \text{A.13}$$

Representando $\log \theta_{cf} = f(t)$, debe aparecer una recta de:

- Ordenada en el origen = $\ln 2,040$.
- Pendiente = $-\left(\frac{2,512}{r_c^2} + \frac{1,071}{a^2}\right) \alpha$

En esta expresión se despeja el valor de la difusividad térmica (α), ya que el resto de los valores son conocidos. Las medidas de r_c y a se dan en metros y la difusividad en $\frac{m^2}{s}$. (Ibarz Ribas y col, 2000)

En la tabla 4.9 se muestran los resultados de la experiencia del proceso enfriamiento.

Para cada resultado se calcula la temperatura adimensional θ_{cf} .

Para cada temperatura T se debe calcular θ_{cf} .

$$\theta_{cf} = \frac{(98 - 29)^{\circ}\text{C}}{(98 - 29)^{\circ}\text{C}} = 1$$

Y luego se calcula el logaritmo neperiano Y_{cf} .

$$\ln(1) = 0$$

Después de repetir los pasos anteriores con todas las temperaturas, se grafican y dará como resultado una recta de pendiente:

$$m = - \left(\frac{2,512}{r_c^2} + \frac{1,071}{a^2} \right) \alpha \quad \text{A.14}$$

Donde:

- m = Pendiente de la recta.
- r_c = Radio del recipiente.
- a = Mitad de la altura del recipiente.
- α = Difusividad térmica.

Al despejar α y sustituir m en la ecuación anterior se obtiene:

$$\alpha = \frac{-0,0012}{-\left(\frac{2,512}{0,0205} + \frac{1,071}{0,02515}\right)} = 1,56441E - 7 \frac{m^2}{s}$$

A.1.2. Cálculo de la densidad del colado.

Se calcula con un picnómetro previamente calibrado con agua destilada. La densidad vendrá dada por la fórmula 4.4:

$$\rho = \frac{(209,7 - 72,6)g}{(199,1 - 72,6)g \times \frac{1mL}{1g}} = 1,0838 \frac{g}{mL}$$

A.1.3. Cálculo de calor específico del colado.

Se calcula mediante un calorímetro (vaso Dewar) por el siguiente método:

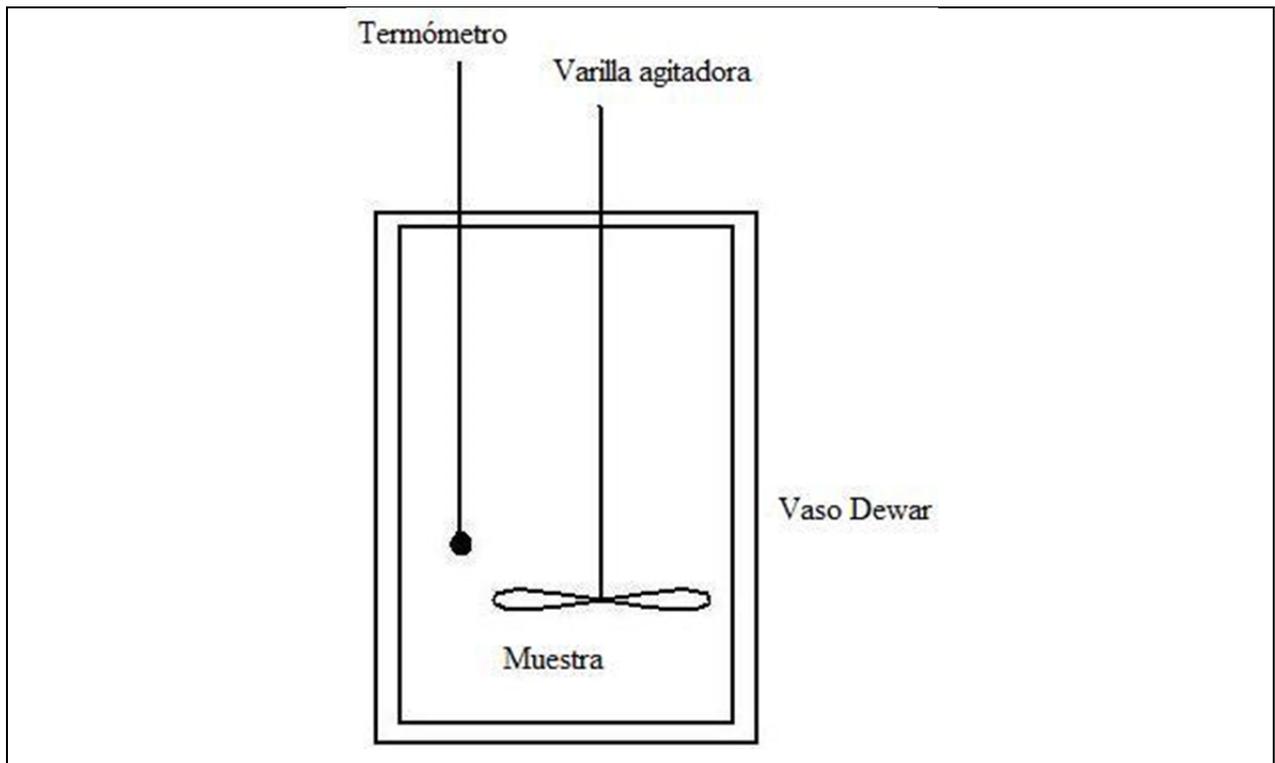


Figura A.1 Esquema del vaso Dewar usado para calcular el calor específico. (Ibarz Ribas y col, 2000)

El calor específico se calcula mediante la ecuación 4.6 y la constante del calorímetro se calcula con la ecuación 4.5

$$K' = 302,0g \times \frac{1gmol}{18g} \times 75,3 \frac{J}{gmol \times K} \times (318 - 318,1)K = -126,37J$$

Al despejar C_e y sustituir los valores de la experiencia se obtiene:

$$C_e = \frac{4,18 \frac{kJ}{kg \times K} (323,5K - 347K) 0,148kg + (-0,12637kJ)}{0,151kg \times (299K - 323,5K)} = 3,96805 \frac{kJ}{kg \times K}$$

A.1.4. Cálculo de la conductividad térmica del colado.

Después de obtener los valores de α , C_p y ρ se puede calcular la conductividad del colado mediante la fórmula 4.8:

$$k = 1,56441E - 7 \frac{m^2}{s} \times 1083,8 \frac{kg}{m^3} \times 3968,05 \frac{J}{kg \times K} = 0,6728 \frac{W}{mK}$$

A.1.5. Determinación de coeficientes de transmisión de calor por convección del túnel de enfriamiento.

El modulo de Biot relaciona las resistencias que ofrecen a la transmisión de calor la conducción en el interior del sólido y la convección en el fluido.

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \tag{A.15}$$

Donde:

- h : Coeficiente de transmisión de calor por convección.
- k : Conductividad térmica del material sólido.
- L_c : Longitud característica del objeto.

En caso que el modulo de Biot sea menor a 0,1 se puede suponer que la resistencia térmica conductiva es despreciable frente a la resistencia convectiva. Por lo tanto, el cambio de energía (temperatura) medido en cualquier punto del objeto es debido al flujo neto de calor recibido por el objeto a través de la resistencia externa al calor.

Al realizar un balance energético, el calor transmitido a través del fluido será igual al acumulado por el objeto, de tal forma que se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = hA(T - T_e) \quad \text{A.16}$$

Siendo:

- A : Área de la superficie del objeto.
- C_p : Capacidad calórica del objeto.
- T : Temperatura del objeto.
- T_e : Temperatura del medio.
- t : Tiempo.
- V : Volumen del objeto.
- ρ : Densidad del objeto.

Al integrar la ecuación con la condición límite que la temperatura inicial del objeto es T_0 , se obtiene la ecuación 4.9:

La pendiente de la recta resultante fue de -0,1979 y aplicando la ecuación 4.9:

$$m = -\frac{hA}{\rho C_p V} \quad \text{A.17}$$

$$-0,1979 = -\frac{h \times 0,00024m^2}{2707 \frac{kg}{m^3} \times 896 \frac{J}{kgK} \times 0,0000001m^3}$$

$$h = 200 \frac{W}{m^2K}$$

Al sustituir las propiedades en la ecuación 2.29 se obtiene el valor del número Biot para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Bi = \frac{200 \frac{W}{m^2K} \times 0,02515m}{0,6728 \frac{W}{mK}} = 7,4764$$

$$Bi = \frac{200 \frac{W}{m^2K} \times 0,0205m}{0,6728 \frac{W}{mK}} = 6,0941$$

Luego con el valor del Biot se extraen de la tabla 2.2 los valores de $\zeta_1=1,38656\text{rad}$ y $C_1=1,2550$ para la pared plana y $\zeta_1=2,0529\text{rad}$ y $C_1=1,5267$ para el cilindro infinito.

Luego con la ecuación 2.28 se obtiene el valor de número de Fourier para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Fo = \frac{1,56441E - 7 \frac{m^2}{s} \times 600s}{(0,02515m)^2} = 0,1484$$

$$Fo = \frac{1,56441E - 7 \frac{m^2}{s} \times 600s}{(0,0205m)^2} = 0,2234$$

Luego al sustituir los valores en la ecuación 2.47 y 2.53:

$$\theta_{0pp}^* = 1,255e^{-(1,3865^2 \times 0,1484)} = 0,943517$$

$$\theta_{0ci}^* = 1,5267e^{-(2,0529^2 \times 0,2234)} = 0,595594$$

Para finalizar se sustituyen los valores en la ecuación 2.58:

$$T_{centro} = 302K + [0,943517 \times 0,595594(350K - 302K)] = 328,9K$$

El modelo arroja como resultado una temperatura en el centro del frasco de 55,9°C lo cual se desvía de la temperatura real de 57,4°C en 1,5°C.

A.1.6. Predicción de la temperatura final de los frascos usando solamente agua a temperatura ambiente.

Para realizar esta predicción se realiza la metodología mostrada en la figura 3.4 con las mismas propiedades usadas anteriormente, pero esta vez con un tiempo de 1200 s que es el tiempo que dura un frasco en atravesar el túnel completo.

Al sustituir las propiedades en la ecuación 2.29 se obtiene el valor del número Biot para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Bi = \frac{200 \frac{W}{m^2K} \times 0,02515m}{0,6728 \frac{W}{mK}} = 7,4764$$

$$Bi = \frac{200 \frac{W}{m^2K} \times 0,0205m}{0,6728 \frac{W}{mK}} = 6,0941$$

Luego con el valor del Biot extraen de la tabla 2.2 los valores de $\zeta_1=1,38656\text{rad}$ y $C_1=1,2550$ para la pared plana y $\zeta_1=2,0529\text{rad}$ y $C_1=1,5267$ para el cilindro infinito.

Luego con la ecuación 2.28 se obtiene el valor de número de Fourier para la pared plana y para el cilindro infinito:

$$Fo = \frac{1,56441E - 7 \frac{m^2}{s} \times 1200s}{(0,02515m)^2} = 0,2968$$

$$Fo = \frac{1,56441E - 7 \frac{m^2}{s} \times 1200s}{(0,0205m)^2} = 0,4467$$

Luego al sustituir los valores en la ecuación 2.47 y 2.53:

$$\theta_{0pp}^* = 1,255e^{-(1,3865^2 \times 0,2968)} = 0,709342$$

$$\theta_{0ci}^* = 1,5267e^{-(2,0529^2 \times 0,4467)} = 0,232352$$

Para finalizar se sustituyen los valores en la ecuación 2.58:

$$T_{centro} = 302K + [0,709342 \times 0,232352(350K - 302K)] = 309,9K$$

$$T_{pared} = 302K + [0,709342 \times 0,232352 \times J_0(2,0529)(350K - 302K)] = 303,5K$$

A.2. Cálculo del intercambio térmico con ambiente en tuberías y equipos.

El método para el cálculo es el de sustituciones sucesivas.

La primera ecuación a usar es la 2.21:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi L K_t} + \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{2\pi L K_a} + \frac{1}{2\pi L r_a h}} \quad A.18$$

Donde:

- q: calor en W .
- T_i : temperatura interna de la tubería en K .
- T_∞ : temperatura ambiente en K .
- r_e : radio externo de la tubería en m .

- r_i : radio interno de la tubería en m .
- r_a : radio externo del aislante en m .
- L : longitud de la tubería en m .
- K_t : conductividad de la tubería en $\frac{W}{mK}$.
- K_a : conductividad del aislante en $\frac{W}{mK}$.
- h : coeficiente convectivo en $\frac{W}{m^2K}$.

Para este ejemplo se hace el cálculo sin aislante, así que $r_a = r_e$.

Al sustituir los valores de la ecuación 2.21 suponiendo un valor cualquiera del coeficiente convectivo; en este ejemplo, se usó $6 \frac{W}{m^2K}$.

$$q = \frac{433K - 303K}{\frac{\ln \frac{0,013335m}{0,010465m}}{2\pi \times 9,19m \times 53,8 \frac{W}{mK}} + \frac{\ln \frac{0,013335m}{0,013335m}}{2\pi \times 9,19m \times 0,11 \frac{W}{mK}} + \frac{1}{2\pi \times 6 \frac{W}{m^2K} \times 0,013335m \times 9,19m}}$$

$$q = 608,98W$$

Luego se usara la misma ecuación 2.21 pero la zona en estudio será del interior de la tubería hasta la temperatura de la pared del aislante.

$$608,98W = \frac{433,13K - T_w}{\frac{\ln \frac{0,013335m}{0,010465m}}{2\pi \times 9,19m \times 53,8 \frac{W}{mK}} + \frac{\ln \frac{0,013335m}{0,013335m}}{2\pi \times 9,19m \times 0,11 \frac{W}{mK}}}$$

Donde T_w es la temperatura de la pared del aislante. Al despejar T_w obtenemos:

$$T_w = 433,08K$$

Luego de obtener el valor de T_w se calcula el coeficiente convectivo usando alguna de las ecuaciones 2.14, 2.15, 2.16 ó 2.17 según corresponda el caso.

Los valores de Pr y Gr se calculan con las propiedades a la temperatura de película que es:

$$T_p = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad \text{A.18}$$

Donde T_p es la temperatura de película.

Las propiedades evaluadas a T_p son:

- $\mu = 0,00002404 \frac{Ns}{m^2}$.
- $\rho = 0,82255 \frac{kg}{m^3}$.
- $C_p = 1,0175 \frac{kJ}{kgK}$.
- $k = 0,03555 \frac{W}{mK}$.
- $\beta = \frac{1}{433,465K}$.
- $D = 0,02667m$.
- $g = 9,8 \frac{m}{s^2}$.

$$GrPr = \frac{C_p D^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{k \mu} = 2,61E - 9 \quad \text{A.19}$$

El valor de GrPr es mayor a 10^9 por lo que la ecuación a usar será la ecuación 2.15.

$$h = 1,8(433,08 - 303)^{0,25} = 6,079 \frac{W}{m^2K}$$

Por lo tanto, la suposición que el coeficiente convectivo es de $6 \frac{W}{m^2K}$ fue muy cercano al coeficiente calculado. En caso de no ser valores cercanos, se vuelven a realizar los cálculos anteriores pero usando el coeficiente convectivo recién calculado.

Este procedimiento se repite usando un espesor del aislante diferente para lo cual se deberá cambiar el valor de r_a de la manera siguiente:

$$espesor = r_a - r_e$$

Para un espesor de 1 cm de aislante:

$$0,01m = r_a - 0,013335m$$

$$r_a = 0,023335m$$

Este mismo procedimiento se realiza para cada equipo que se proponga para colocarle aislante térmico o para conocer qué cantidad de calor se pierde al ambiente a través de éste.

A.3. Cálculo del gasto monetario ahorrado al implementar el aislamiento a tuberías o equipos.

Para conocer el ahorro monetario es necesario conocer el ahorro en combustible por la instalación del aislante de lana mineral.

$$\frac{q}{\Delta H_c \times \rho} = Q \tag{A.20}$$

$$Q \times Costo.comb = dinero.ahorrado \tag{A.21}$$

Donde:

- q: calor que ya no se pierde debido al aislante. (W)
- ΔH_c : calor de formación del combustible. $\left(\frac{J}{g}\right)$
- ρ : densidad del combustible. $\left(\frac{g}{mL}\right)$
- Q: caudal de combustible ahorrado. $\left(\frac{mL}{s}\right)$
- Costo.comb: costo del combustible usado para calentar los fluidos. $\left(\frac{Bs}{mL}\right)$
- Dinero.ahorrado: dinero ahorrado al usar el aislante. $\left(\frac{Bs}{s}\right)$

Para el caso de las tuberías de vapor y de colado después de la instalación del aislante térmico:

$$\frac{976,85 J}{s} \times \frac{1 cal}{4,184 J} \times \frac{1 g}{10505,6 cal} \times \frac{1 mL}{0,77 g} \times \frac{3600s}{h} = \frac{103,9 mL}{h}$$

$$\frac{103,9 mL}{h} \times \frac{8h}{1 dia} \times \frac{1L}{1000mL} \times \frac{Bs0,22}{1L} = \frac{Bs0,1829}{dia}$$

Para el caso de las marmitas después de la instalación del aislante térmico:

$$\frac{1189,94 J}{s} \times \frac{1 cal}{4,184 J} \times \frac{1 g}{10505,6 cal} \times \frac{1 mL}{0,77 g} \times \frac{3600s}{h} = \frac{126,57 mL}{h}$$

$$\frac{126,57 mL}{h} \times \frac{8h}{1 dia} \times \frac{1L}{1000mL} \times \frac{Bs0,22}{1L} = \frac{Bs0,2228}{dia}$$

Para el intercambiador de calor después de la instalación del aislante térmico:

$$\frac{322,54 J}{s} \times \frac{1 cal}{4,184 J} \times \frac{1 g}{10505,6 cal} \times \frac{1 mL}{0,77 g} \times \frac{3600s}{h} = \frac{34,31 mL}{h}$$

$$\frac{34,31 \text{ mL}}{h} \times \frac{8h}{1\text{dia}} \times \frac{1L}{1000\text{mL}} \times \frac{Bs0,22}{1L} = \frac{Bs0,0604}{\text{dia}}$$

Para el caso de la eliminación del intercambiador de calor:

$$\frac{499,85 \text{ J}}{s} \times \frac{1 \text{ cal}}{4,184 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ g}}{10505,6 \text{ cal}} \times \frac{1 \text{ mL}}{0,77 \text{ g}} \times \frac{3600s}{h} = \frac{53,17 \text{ mL}}{s}$$

$$\frac{53,17 \text{ mL}}{s} \times \frac{8h}{1\text{dia}} \times \frac{1L}{1000\text{mL}} \times \frac{Bs0,22}{1L} = \frac{Bs0,0936}{\text{dia}}$$

Para el caso de la nueva marmita:

$$\frac{1264,14 \text{ J}}{s} \times \frac{1 \text{ cal}}{4,184 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ g}}{10505,6 \text{ cal}} \times \frac{1 \text{ mL}}{0,77 \text{ g}} \times \frac{3600s}{h} = \frac{134,46 \text{ mL}}{h}$$

$$\frac{134,46 \text{ mL}}{h} \times \frac{8h}{1\text{dia}} \times \frac{1L}{1000\text{mL}} \times \frac{Bs0,22}{1L} = \frac{Bs0,2367}{\text{dia}}$$

A.4. Cálculo del consumo eléctrico del compresor usado para enfriar el agua del túnel de enfriamiento.

La potencia del compresor es $20hp$ y su factor de potencia de $0,8$ son obtenidos de los valores nominales del equipo, el tiempo de uso diario es de 8 horas. Debido a que la compañía eléctrica no factura la energía reactiva se debe tomar en cuenta el factor de potencia al calcular el costo de operación del equipo. (Alcalde, 2004)

$$S \times \cos \theta = P \tag{A.22}$$

Donde:

- S: Potencia aparente.

- $\cos\theta$: factor de potencia.
- P: potencia activa.

$$20hp \times 0,8 \times \frac{745,5W}{1hp} = 11928W$$

$$\frac{11928J}{s} \times \frac{3600s}{h} \times \frac{8h}{dia} = \frac{343526400J}{dia}$$

$$\frac{343526400J}{dia} \times \frac{1h}{3600s} = 95424Wh/dia$$

Luego de obtener la potencia consumida por el compresor se puede calcular cuál es el costo del funcionamiento de éste.

$$P_{costo.p} = costo.op$$

A.23

Donde:

- P: potencia. (kWh/dia)
- Costo.p: costo de la energía eléctrica. (Bs/kWh)
- Costo.op: costo de operación. (Bs/dia)

$$95,424kWh/dia \times \frac{Bs0,47}{kWh} = \frac{Bs44,85}{dia}$$

A.5. Cálculo del consumo eléctrico de los ventiladores del túnel de enfriamiento.

La potencia de cada ventilador de $\frac{1}{6}$ hp y su factor de potencia de 0,8 son obtenidos de los valores nominales del equipo.

$$\frac{1}{6} \text{ hp} \times 745,5 \frac{\text{W}}{\text{hp}} \times 0,8 \times 8 = 795,2 \text{ W}$$

$$\frac{795,2 \text{ J}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \times \frac{8 \text{ h}}{\text{dia}} = \frac{22901760 \text{ J}}{\text{dia}}$$

$$\frac{22901760 \text{ J}}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 6361,6 \text{ Wh/dia}$$

$$6,3616 \text{ kWh/dia} \times \frac{\text{Bs}0,47}{\text{kWh}} = \frac{\text{Bs}2,99}{\text{dia}}$$

APÉNDICE B

En este apartado se presentan las tablas usadas para el ordenamiento de la recolección de datos durante el proyecto.

Tabla B.1 Programación de los datos para la capacidad de los equipos.

Equipo	Altura h (cm)	Diámetro D (cm)	Volumen (cm ³)	Observaciones
Tanque de mezclado				
Marmita 1				
Marmita 2				
Envasadora				

Tabla B.2 Programación de los datos para las tuberías y condiciones de operación.

Fluido	Material	Diámetro (in)	Longitud (cm)	Temperatura del fluido (°C)
Colado				
Vapor				

Tabla B.3 Programación de los datos para las condiciones de operación de los equipos y otras especificaciones.

Equipo	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Frascos/min	Observaciones
Marmita 1				
Marmita 2				
Intercambiador de calor				
Calentador de frascos				
Envasadora				
Tapadora				
Túnel de enfriamiento 1				
Túnel de enfriamiento 2				

Tabla B.4 Guía de entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

Guía de entrevista sobre pérdidas de energía en la línea de producción de colados.

Personal entrevistado:

Introducción.

Averiguar qué factores intervienen en las pérdidas de energía de la línea de producción de colados. Fueron elegidos los operadores de la línea y el supervisor, ya que son los que mejor conocen los materiales, equipos y las instalaciones de la línea.

Características de la entrevista.

Confidencial. Duración aproximada 10 min. (Este punto no siempre es conveniente, solamente que el entrevistado pregunte por el tiempo, se puede decir algo como: no durara más de 10 min)

Preguntas.

1. ¿Las marmitas trabajan correctamente?
2. ¿Es adecuado el intercambiador de calor?
3. ¿El calentador de frascos trabaja correctamente?
4. ¿La envasadora trabaja correctamente?
5. ¿La tapadora funciona correctamente?
6. ¿Es adecuado el túnel de enfriamiento?
7. ¿Se pueden reparar las fallas de estos equipos?
8. ¿Hace falta algún equipo o material extra en la línea de producción? ¿Por qué?
9. ¿Considera que algún equipo está de sobra en la línea de producción? ¿Por qué?
10. ¿Tienen buen aislamiento las tuberías de fluidos caliente?
11. ¿Tienen buen aislamiento las marmitas?

Observaciones.

Agradecimiento e insistir en la confidencialidad y la posibilidad de participaciones futuras.

Nota.

Esta guía es de recomendaciones, cada entrevista es una experiencia única de dialogo y no hay estandarizaciones.

Tabla B.5 Modelo de tablas de respuestas del personal a la entrevista sobre perdidas de energía en la línea de producción de colados.

Personal entrevistado:	
1.	
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
11.	

Tabla B.6 Modelo de matriz de causa – efecto para identificar las causas más significativas en el proceso.

Personal entrevistado:						
	Causas	P1	P2	P3	Sumatoria	%
1	Diseño inadecuado de los equipos					
2	Falta de aislante en los equipos					
3	Equipos innecesarios					
4	Deterioro del los elementos del sistema					
5	Inadecuada inspección del proceso					
6	Inexistencia de manuales					
7	Calidad del agua					
8	Mantenimiento insuficiente					
9	Inexistencia de control estadístico					
10	Carencia de equipos de medición					
11	Capacitación					
12	Habilidad					
13	Incentivos					
Total						100

Tabla B.7 Modelo de la matriz de selección.

Factores	Peso (%)	Alternativas													
		A		B		C		D		E		F		G	
		Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo	Esc ala	Múlti plo
Menor pérdida de energía	25														
Inversión inicial	20														
Costos operacionales	20														
Requerimientos de espacio en la planta	20														
Mantenimiento	10														
Seguridad	5														
Total	100														

- A: colocar aislante a las tuberías.
- B: colocar aislante a las marmitas.
- C: colocarle aislante al intercambiador de calor.
- D: usar solamente agua a temperatura ambiente en el túnel de enfriamiento.
- E: eliminar el intercambiador de calor.
- F: cambiar el túnel de enfriamiento.
- G: cambiar las marmitas.

APÉNDICE C

En este apartado, se darán las hojas de especificación de los equipos seleccionados y dimensionados en los capítulos anteriores.

Tabla C1 Hoja de especificación de las cañuelas aislantes.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
NOMBRE:	
Aislante de tuberías de vapor y de colado.	
FUNCIÓN:	
Disminuir el intercambio térmico al ambiente y prevenir el daño mecánico y la corrosión generada por el agua y otros agentes.	
Nº total de unidades: 11 de 3 ½ pulgadas. 11 de ¾ pulgadas.	
CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
Temperatura interna:	Fluido interno de la tubería a aislar:
<ul style="list-style-type: none"> ¾: 433K. 3 ½: 348K. 	<ul style="list-style-type: none"> ¾: Vapor. 3 ½: Colado.
CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	
Espesor:	Longitud:
<ul style="list-style-type: none"> 2,5 pulgadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ¾: 9,20 metros. 3 ½: 9,60 metros.
PROPIEDADES	
Densidad	$110 \frac{kg}{m^3}$
Conductividad térmica	$0,11 \frac{W}{mK}$
Combustibilidad	No combustible, no propaga gases

Tabla C.2 Hoja de especificaciones de cemento aislante y de terminado ROCALÁN.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
NOMBRE: Aislante de las marmitas y del intercambiador de calor.	
FUNCIÓN: Disminuir el intercambio térmico al ambiente y prevenir el daño mecánico y la corrosión generada por el agua y otros agentes.	
Nº total de unidades: 5 sacos de 25kg	
CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
Temperatura interna: <ul style="list-style-type: none"> • 433K. 	Fluido interno de la tubería a aislar: <ul style="list-style-type: none"> • Vapor.
CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	
Espesor: <ul style="list-style-type: none"> • 4 centímetros. 	Volumen: <ul style="list-style-type: none"> • 0,15 metros cúbicos para las marmitas. • 0,01 metros cúbicos para el intercambiador de calor.
PROPIEDADES	
Densidad	$700 \frac{kg}{m^3}$
Conductividad térmica	$0,11 \frac{W}{mK}$
Combustibilidad	No combustible, no propaga gases

APÉNDICE D

En este apartado se presentarán todas las tablas y figuras bibliográficas que se utilizaron como soporte para el cálculo de los equipos, como también para la evaluación económica del proyecto.

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K					Propiedades a varias temperaturas (K)									
		ρ (kg m ⁻³)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W m · K)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)	c_p (J/kg · K)	k (W m · K)
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1			
Aceros al carbono Carbono unilíneo (Mn \leq 1%, Si \leq 0.1%)	7854	434	60.5	17.7	216	384	490	574	680	775	699	654				
AISI 1010	7802	434	63.9	18.8			56.7	48.0	39.2							
Carbono silicio (Mn \leq 1%, 0.1% < Si \leq 0.6%)	7817	446	51.9	14.9			487	559	685	1169						
Carbono-manganeso-silicio (1% < Mn \leq 1.65%, 0.1% < Si \leq 0.6%)	8131	434	41.0	11.6			42.2	39.7	35.0	27.6						
Aceros con cromo (baño) (Cr = Mo = Si)	7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9						
(0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)	7858	442	42.3	12.2			492	575	688	969						
(0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)	7836	441	48.9	14.1			42.0	39.1	34.5	27.4						
(0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)							492	575	688	969						
Aceros inoxidables																
AISI 302	8055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4						
AISI 304	7900	477	14.9	3.95			512	559	585	606						
AISI 316	8238	468	13.4	3.48			12.6	19.8	22.6	25.4						
AISI 347	7978	480	14.2	3.71			272	402	515	582	611	640	682	317		
							504	550	576	602						
							15.8	18.9	21.9	24.7						
							511	559	585	606						

Figura D.1 Propiedades termofísicas de sólidos metálicos. (Incropera y DeWitt, 1999)

Descripción/ composición	Temperatura máxima de servicio (K)	Densidad típica (kg/m ³)	Conductividad térmica típica, k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹), a varias temperaturas (K)													
			200	215	230	240	255	270	285	300	310	365	420	530	645	750
Vidrio celular	700	145			0.046	0.048	0.051	0.052	0.055	0.058	0.062	0.069	0.079	0.092	0.098	0.104
Oxido de silicio diatómico	1145	345														
	1310	385														
Poliestireno, rígido	350	96	0.023	0.023	0.022	0.023	0.023	0.023	0.025	0.026	0.027	0.029				
Extruido (R-12)	350	35	0.023	0.023	0.023	0.025	0.025	0.025	0.026	0.027	0.029					
Extruido (R-12)	350	16	0.026	0.029	0.030	0.033	0.035	0.036	0.038	0.040						
Lechosa molida en gotas, espumada rígida	340	70							0.029	0.030	0.032	0.033				
Cemento aislante																
Fibra mineral (roca, escoria o vidrio)																
Con aglomerante de arcilla	1255	430										0.071	0.079	0.088	0.105	0.123
Con aglomerante de fibra de vidrio																
Con aglomerante de fibra de vidrio	922	560											0.108	0.115	0.123	0.137
Reducido molido																
Celulosos, madera, o pulpa de papel		45												0.038	0.039	0.042
Perforada, espumada		105	0.036	0.039	0.042	0.043	0.046	0.049	0.051	0.053	0.056					
Vermiculita, expandida		122			0.056	0.058	0.061	0.063	0.065	0.068	0.071					
		80			0.049	0.051	0.055	0.058	0.061	0.063	0.066					

Figura D.2 Propiedades termofísicas de aislamiento industrial. (Incropera y DeWitt, 1999)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Figura D.3 Propiedades de aire a presión atmosférica. (Incropera y DeWitt, 1999)

Temperatura, T (K)	Presión P (bar)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpia de vaporización h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)	Viscosidad (N · s/m ²)	Conductividad térmica (W · m · K ⁻¹)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\sigma_s \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expansión $\beta_s \cdot 10^4$ (K ⁻¹)	Temperatura T (K)		
		$v_f \cdot 10^3$	v_g				$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g					
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.1
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	13.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	170.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	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	0.01917	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	0.02617	1.002	51.04	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	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	0.04712	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	0.06221	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	0.08132	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	0.1053	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	0.1351	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	0.1719	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	0.2167	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	0.2713	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	0.3372	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	0.4163	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	0.5100	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	0.6209	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	0.7514	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	0.9040	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	1.0133	1.044	1.619	2253	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.1
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

Figura D.4 Propiedades termofísicas de agua saturada. (Incropera y DeWitt, 1999)

390	1.794	1.058	0.080	2212	4.239	2.104	233	12.69	686	26.3	1.41	1.013	55.6	841	390
400	2.455	1.067	0.1731	2183	4.256	2.138	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896	400
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952	410
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.3	1.16	1.075	49.4	1010	420
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	1070	430
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	1130	440
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9	1190	450
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	1250	460
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	1310	470
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	1370	480
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	33.9	1430	490
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	1490	500
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	1550	510
520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	1610	520
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	1670	530
540	52.38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	1730	540
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	1790	550
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	1850	560
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	1910	570
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	90.6	0.99	1.68	12.8	1970	580
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	105.9	1.05	1.84	10.5	2030	590
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	122.9	1.14	2.15	8.4	2090	600
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	141.4	1.30	2.60	6.3	2150	610
620	159.1	1.705	0.0094	941	9.35	15.4	72	25.9	444	171.4	1.52	3.46	4.5	2210	620
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	193.4	1.65	4.20	3.5	2270	625
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	218.4	2.0	4.8	2.6	2330	630
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392	245.4	2.7	6.0	1.5	2390	635
640	202.7	2.075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	275.4	4.2	9.6	0.8	2450	640
645	215.2	2.351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	318.4	12	26	0.1	2510	645
647.3	221.2	3.170	0.0032	0	—	—	45	45.0	238	—	—	—	0.0	2570	647.3

Figura D.4 (continuación) Propiedades termofísicas de agua saturada. (Incropera y DeWitt, 1999)

$Bi = \frac{hL}{k}$	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
0	0	3.1416	6.2832	9.4248
0.001	0.0316	3.1419	6.2833	9.4249
0.002	0.0447	3.1422	6.2835	9.4250
0.004	0.0632	3.1429	6.2838	9.4252
0.006	0.0774	3.1435	6.2841	9.4254
0.008	0.0893	3.1441	6.2845	9.4256
0.01	0.0998	3.1448	6.2848	9.4258
0.02	0.1410	3.1479	6.2864	9.4269
0.04	0.1987	3.1543	6.2895	9.4290
0.06	0.2425	3.1606	6.2927	9.4311
0.08	0.2791	3.1668	6.2959	9.4333
0.1	0.3111	3.1731	6.2991	9.4354
0.2	0.4328	3.2039	6.3148	9.4459
0.3	0.5218	3.2341	6.3305	9.4565
0.4	0.5932	3.2636	6.3461	9.4670
0.5	0.6533	3.2923	6.3616	9.4775
0.6	0.7051	3.3204	6.3770	9.4879
0.7	0.7506	3.3477	6.3923	9.4983
0.8	0.7910	3.3744	6.4074	9.5087
0.9	0.8274	3.4003	6.4224	9.5190
1.0	0.8603	3.4256	6.4373	9.5293
1.5	0.9882	3.5422	6.5097	9.5801
2.0	1.0769	3.6436	6.5783	9.6296
3.0	1.1925	3.8088	6.7040	9.7240
4.0	1.2646	3.9352	6.8140	9.8119
5.0	1.3138	4.0336	6.9096	9.8928
6.0	1.3496	4.1116	6.9924	9.9667
7.0	1.3766	4.1746	7.0640	10.0339
8.0	1.3978	4.2264	7.1263	10.0949
9.0	1.4149	4.2694	7.1806	10.1502
10.0	1.4289	4.3058	7.2281	10.2003
15.0	1.4729	4.4255	7.3959	10.3898
20.0	1.4961	4.4915	7.4954	10.5117
30.0	1.5202	4.5615	7.6057	10.6543
40.0	1.5325	4.5979	7.6647	10.7334
50.0	1.5400	4.6202	7.7012	10.7832
60.0	1.5451	4.6353	7.7259	10.8172
80.0	1.5514	4.6543	7.7573	10.8606
100.0	1.5552	4.6658	7.7764	10.8871
∞	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956

Figura D.5 Primeras cuatro raíces de la ecuación trascendental para conducción transitoria en una pared plana. (Incropera y DeWitt, 1999)

x	$J_0(x)$	$J_1(x)$
0.0	1.0000	0.0000
0.1	0.9975	0.0499
0.2	0.9900	0.0995
0.3	0.9776	0.1483
0.4	0.9604	0.1960
0.5	0.9385	0.2423
0.6	0.9120	0.2867
0.7	0.8812	0.3290
0.8	0.8463	0.3688
0.9	0.8075	0.4059
1.0	0.7652	0.4400
1.1	0.7196	0.4709
1.2	0.6711	0.4983
1.3	0.6201	0.5220
1.4	0.5669	0.5419
1.5	0.5118	0.5579
1.6	0.4554	0.5699
1.7	0.3980	0.5778
1.8	0.3400	0.5815
1.9	0.2818	0.5812
2.0	0.2239	0.5767
2.1	0.1666	0.5683
2.2	0.1104	0.5560
2.3	0.0555	0.5399
2.4	0.0025	0.5202

Figura D.6 Funciones de Bessel de primera clase. (Incropera y DeWitt, 1999)

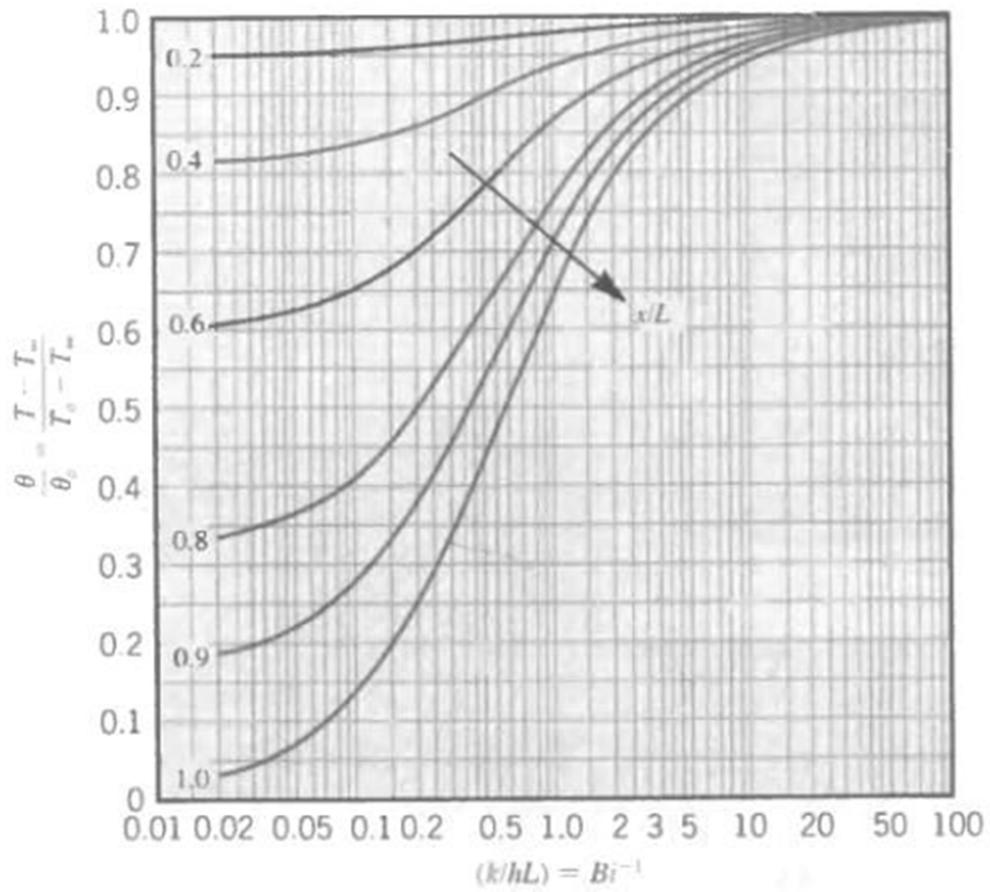


Figura D.7 Distribución de temperatura en una pared plana de espesor $2L$. (Incropera y DeWitt, 1999)

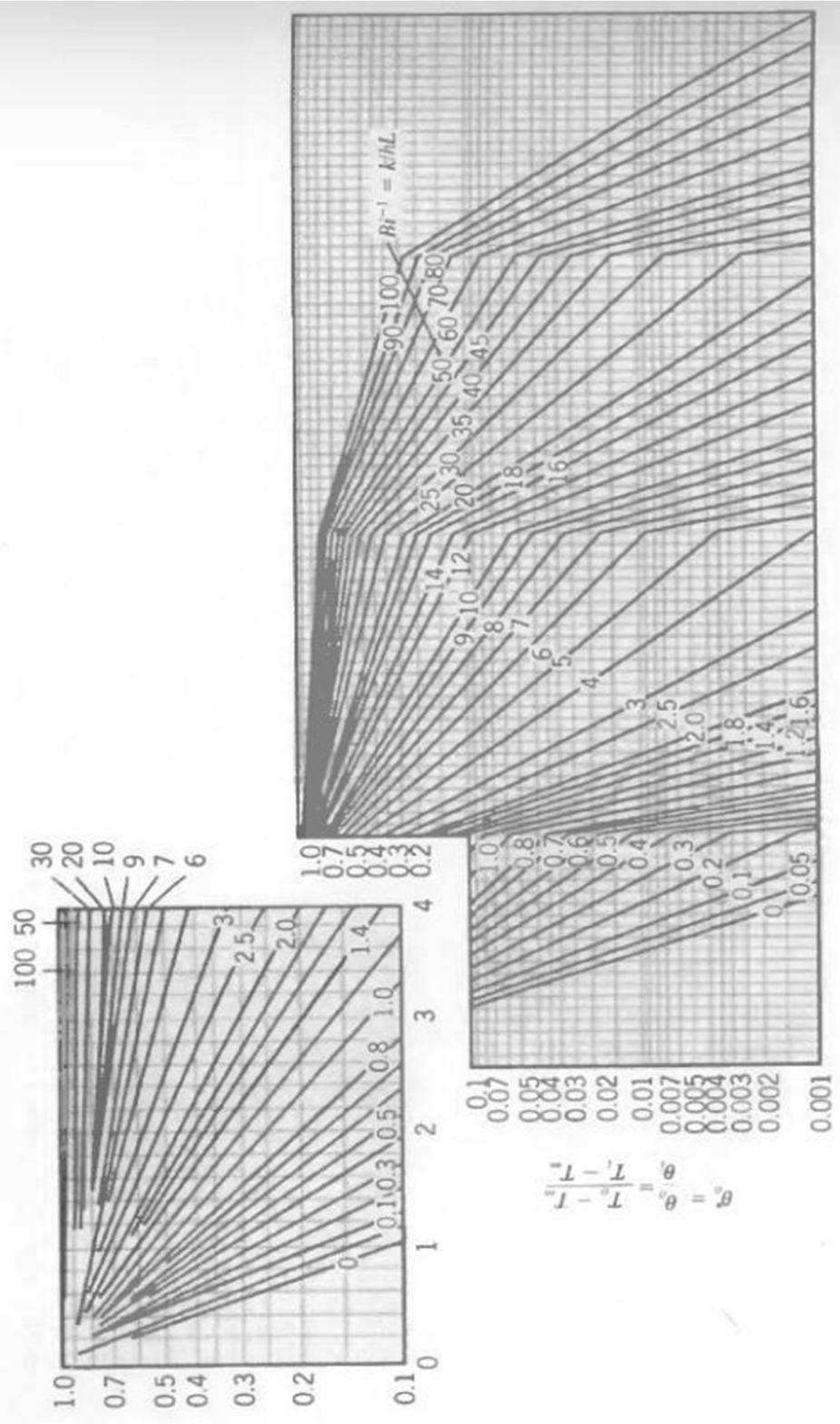


Figura D.8 Temperatura del plano medio como función del tiempo para una pared plana de espesor $2L$. (Incropera y DeWitt, 1999)

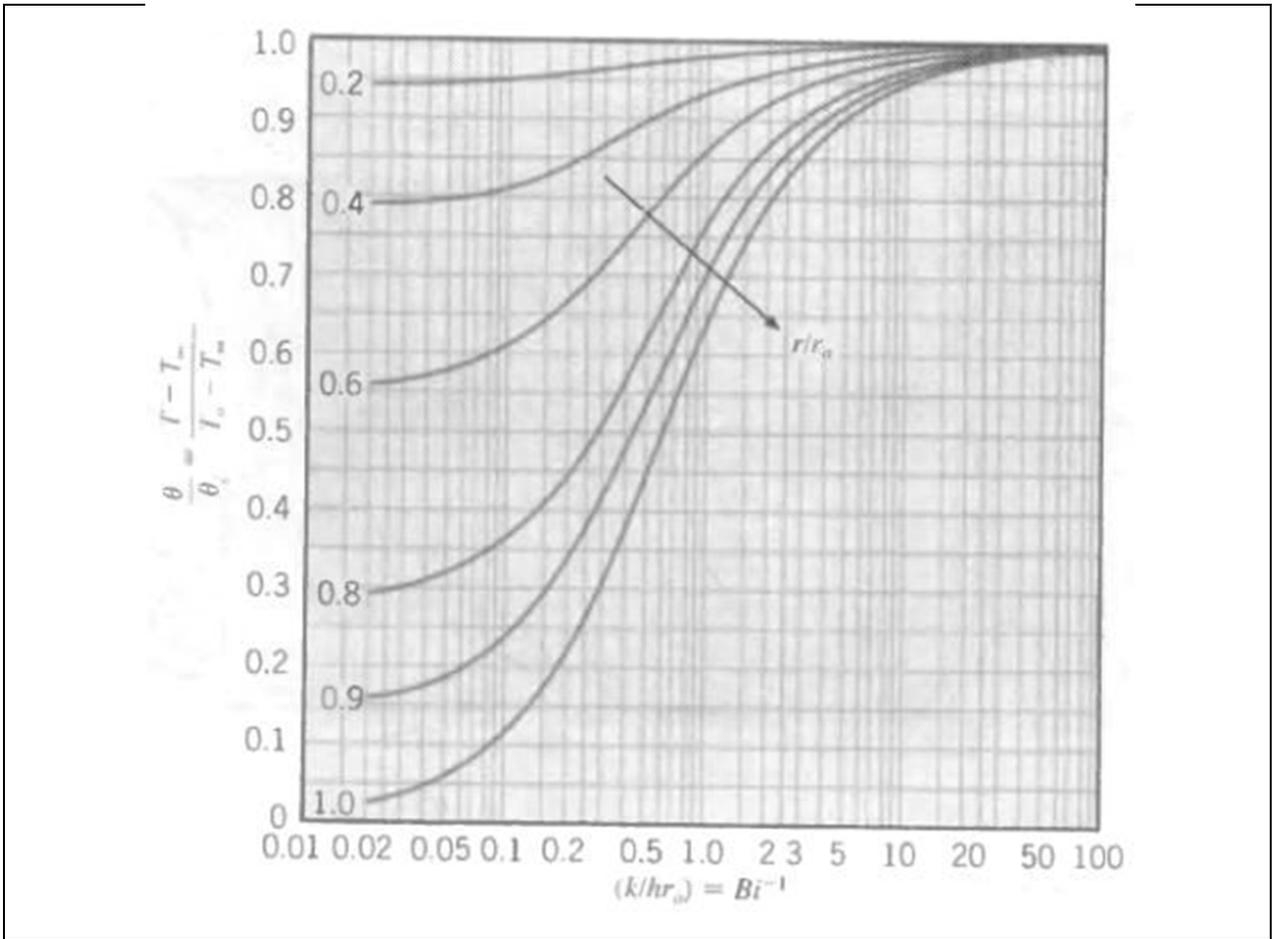


Figura D.9 Distribución de temperaturas en un cilindro infinito de radio r_0 . (Incropera y DeWitt, 1999)

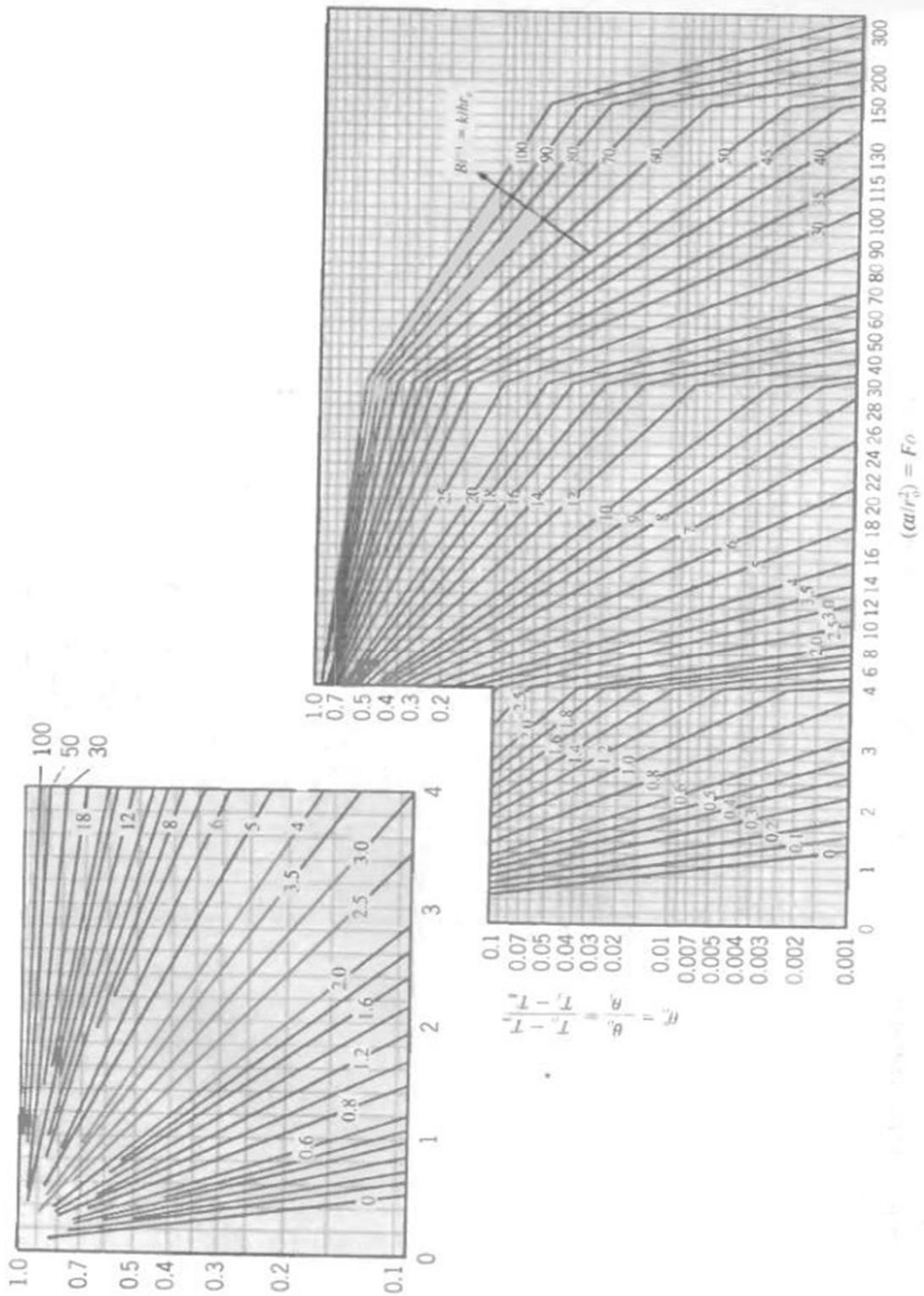


Figura D.10 Temperaturas de la línea central como función del tiempo para un cilindro infinito de radio r_0 . (Incropera y DeWitt, 1999)

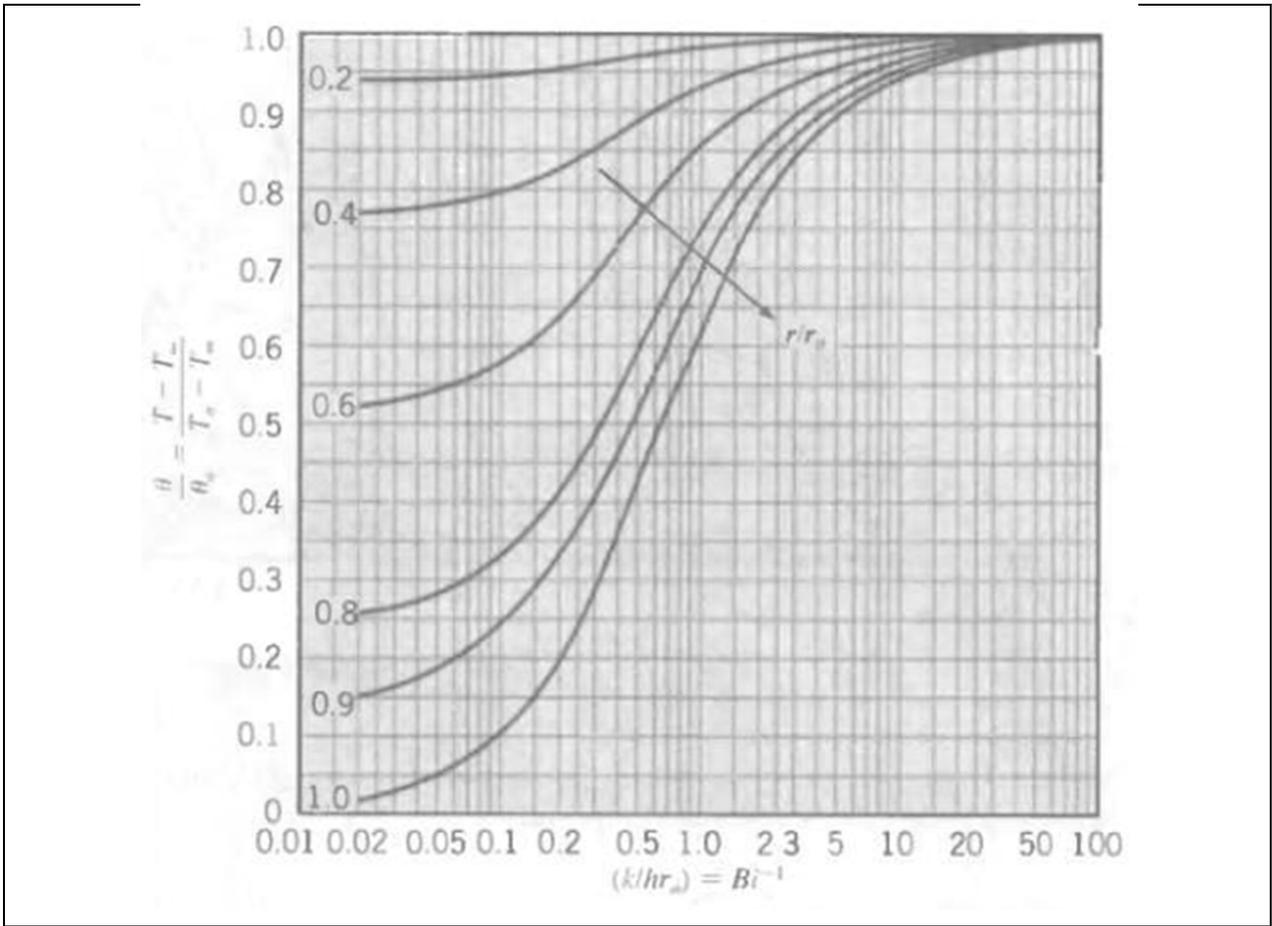


Figura D.11 Distribución de temperaturas en una esfera de radio r_o . (Incropera y DeWitt, 1999)

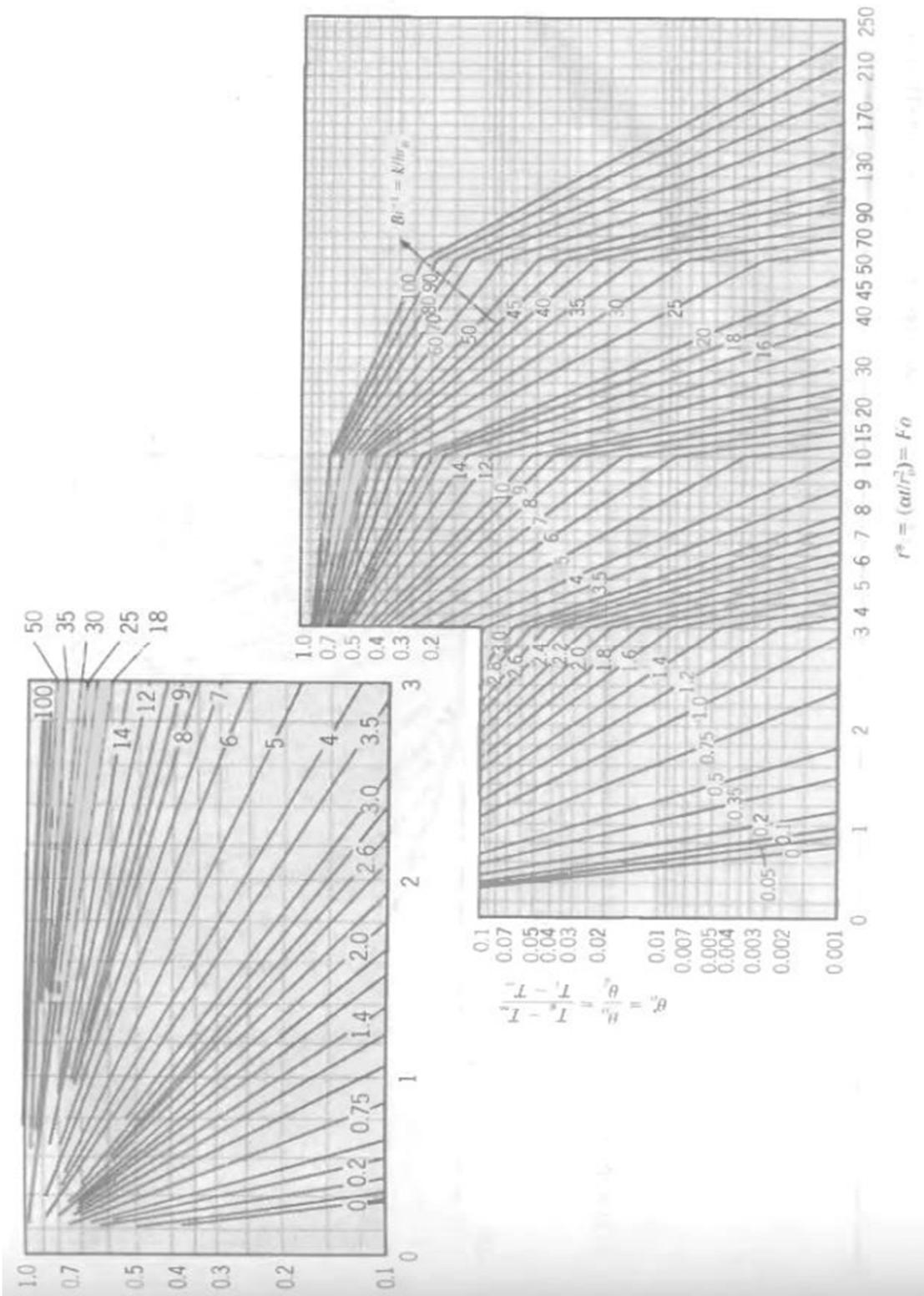


Figura D.12 Temperatura de centro como función del tiempo en una esfera de radio r_0 . (Incropera y DeWitt, 1999)

Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Espesor de la pared, in	Diám. interior, in	Área de corte transversal		Circunferencias, ft, o superficie, ft ² /ft de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tub. de extremos lisos, en lb/ft
					Metal en in ²	Flujo en ft ²	Exterior	Interior	U.S. gal/min	Lb/h de agua	
¾	0.405	10S	0.049	0.307	0.055	0.00051	0.106	0.0804	0.231	115.5	0.19
		40ST, 40S	.068	.269	.072	.00040	.106	.0705	.179	89.5	.24
		80XS, 80S	.095	.215	.093	.00025	.106	.0563	.113	56.5	.31
¾	0.540	10S	.065	.410	.097	.00092	.141	.107	.412	206.5	.33
		40ST, 40S	.088	.364	.125	.00072	.141	.095	.323	161.5	.42
		80XS, 80S	.119	.302	.157	.00050	.141	.079	.224	112.0	.54
¾	0.675	10S	.065	.545	.125	.00162	.177	.143	.727	363.5	.42
		40ST, 40S	.091	.493	.167	.00133	.177	.129	.596	298.0	.57
		80XS, 80S	.126	.423	.217	.00098	.177	.111	.440	220.0	.74
¾	0.840	5S	.065	.710	.158	.00275	.220	.186	1.234	617.0	.54
		10S	.083	.674	.197	.00248	.220	.176	1.112	556.0	.67
		40ST, 40S	.109	.622	.250	.00211	.220	.163	0.945	472.0	.85
		80XS, 80S	.147	.546	.320	.00163	.220	.143	0.730	365.0	1.09
		160	.188	.464	.385	.00117	.220	.122	0.527	263.5	1.31
		XX	.294	.252	.504	.00035	.220	.066	0.155	77.5	1.71
¾	1.050	5S	.065	.920	.201	.00461	.275	.241	2.072	1036.0	0.69
		10S	.083	.884	.252	.00426	.275	.231	1.903	951.5	0.86
		40ST, 40S	.113	.824	.333	.00371	.275	.216	1.665	832.5	1.13
		80XS, 80S	.154	.742	.433	.00300	.275	.194	1.345	672.5	1.47
		160	.219	.612	.572	.00204	.275	.160	0.917	458.5	1.94
		XX	.308	.434	.718	.00103	.275	.114	0.461	230.5	2.44
1	1.315	5S	.065	1.185	.255	.00768	.344	.310	3.449	1725	0.87
		10S	.109	1.097	.413	.00656	.344	.287	2.946	1473	1.40
		40ST, 40S	.133	1.049	.494	.00600	.344	.275	2.690	1345	1.68
		80XS, 80S	.179	0.957	.639	.00499	.344	.250	2.240	1120	2.17
		160	.250	0.815	.836	.00362	.344	.213	1.625	812.5	2.84
		XX	.358	0.599	1.076	.00196	.344	.157	0.878	439.0	3.66
1½	1.660	5S	.065	1.530	0.326	.01277	.435	.401	5.73	2865	1.11
		10S	.109	1.442	0.531	.01134	.435	.378	5.09	2545	1.81
		40ST, 40S	.140	1.380	0.668	.01040	.435	.361	4.57	2285	2.27
		80XS, 80S	.191	1.278	0.881	.00891	.435	.335	3.99	1995	3.00
		160	.250	1.160	1.107	.00734	.435	.304	3.29	1645	3.76
		XX	.382	0.896	1.534	.00438	.435	.235	1.97	985	5.21
1½	1.900	5S	.065	1.770	0.375	.01709	.497	.463	7.67	3835	1.28
		10S	.109	1.682	0.614	.01543	.497	.440	6.94	3465	2.09
		40ST, 40S	.145	1.610	0.800	.01414	.497	.421	6.34	3170	2.72
		80XS, 80S	.200	1.500	1.069	.01225	.497	.393	5.49	2745	3.63
		160	.281	1.338	1.429	.00976	.497	.350	4.38	2190	4.86
		XX	.400	1.100	1.885	.00660	.497	.288	2.96	1480	6.41
2	2.375	5S	.065	2.245	0.472	.02749	.622	.588	12.34	6170	1.61
		10S	.109	2.157	0.776	.02538	.622	.565	11.39	5695	2.64
		40ST, 40S	.154	2.067	1.075	.02330	.622	.541	10.45	5225	3.65
		80ST, 80S	.218	1.939	1.477	.02050	.622	.508	9.20	4600	5.02
		160	.344	1.687	2.195	.01552	.622	.436	6.97	3485	7.46
		XX	.436	1.503	2.656	.01232	.622	.393	5.53	2765	9.03
2½	2.875	5S	.083	2.709	0.728	0.04003	.753	.709	17.97	8985	2.48
		10S	.120	2.635	1.039	.03787	.753	.690	17.00	8500	3.53
		40ST, 40S	.203	2.469	1.704	.03322	.753	.647	14.92	7460	5.79
		80XS, 80S	.276	2.323	2.254	.02942	.753	.608	13.20	6600	7.66
		160	.375	2.125	2.945	.02463	.753	.556	11.07	5535	10.01
		XX	.552	1.771	4.028	.01711	.753	.464	7.68	3840	13.69

Figura D.13 Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías normalizadas de acero.

(Perry y Col., 2000)

Compuesto	Fórmula	Estado	Calor de combustión, $-\Delta H_c^\circ$, a 25 °C y presión constante					
			H ₂ O (líq.) y CO ₂ (gas)			H ₂ O (gas) y CO ₂ (gas)		
			kcal. por mol	cal. por g	B.t.u. por lb.	kcal. por mol	cal. por g	B.t.u. por lb.
2,3-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	gas	1 316.13	11 522.4	20 727	1 221.45	10 693.5	19 236
2,3-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 306.86	11 441.2	20 581	1 212.18	10 612.3	19 090
2,4-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	gas	1 314.83	11 511.0	20 706	1 220.15	10 682.1	19 215
2,4-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 305.80	11 431.9	20 564	1 211.12	10 603.0	19 073
2,5-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	gas	1 314.05	11 504.2	20 694	1 219.37	10 675.3	19 203
2,5-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 305.00	11 424.9	20 551	1 210.32	10 596.0	19 060
3,3-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	gas	1 314.65	11 509.4	20 703	1 219.97	10 680.5	19 212
3,3-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 305.68	11 430.9	20 562	1 211.00	10 602.0	19 071
3,4-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	gas	1 316.36	11 524.4	20 730	1 221.68	10 695.5	19 239
3,4-Dimetilhexano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 307.04	11 442.8	20 583	1 212.36	10 613.9	19 092
2-Metil-3-etilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 316.79	11 528.1	20 737	1 222.11	10 699.2	19 246
2-Metil-3-etilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 307.58	11 447.5	20 592	1 212.90	10 618.6	19 101
3-Metil-3-etilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 315.88	11 520.2	20 723	1 221.20	10 691.3	19 232
3-Metil-3-etilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 306.80	11 440.7	20 580	1 212.12	10 611.8	19 089
2,2,3-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 314.66	11 509.5	20 703	1 219.98	10 680.6	19 212
2,2,3-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 305.83	11 432.2	20 564	1 211.15	10 603.3	19 073
2,2,4-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 313.69	11 501.0	20 688	1 219.01	10 672.1	19 197
2,2,4-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 305.29	11 427.5	20 556	1 210.61	10 598.6	19 065
2,3,3-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 315.34	11 517.2	20 717	1 220.86	10 688.3	19 226
2,3,3-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 306.64	11 439.3	20 577	1 211.96	10 610.4	19 086
2,3,4-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	gas	1 315.29	11 515.0	20 715	1 220.61	10 686.1	19 222
2,3,4-Trimetilpentano	C ₈ H ₁₈	líq.	1 306.28	11 436.1	20 572	1 211.60	10 607.2	19 080
2,2,3,3-Trimetilbutano	C ₈ H ₁₈	gas	1 313.27	11 497.3	20 682	1 218.59	10 668.4	19 191
2,2,3,3-Trimetilbutano	C ₈ H ₁₈	sól.	1 303.03	11 407.7	20 520	1 208.35	10 578.8	19 029
n-Nonano	C ₉ H ₂₀	gas	1 474.90	11 500.2	20 687	1 369.70	10 680.0	19 211
n-Nonano	C ₉ H ₂₀	líq.	1 463.80	11 413.6	20 531	1 358.60	10 593.4	19 056
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	gas	1 632.34	11 473.0	20 638	1 516.63	10 659.7	19 175
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	líq.	1 620.06	11 386.7	20 483	1 504.35	10 573.4	19 020
n-Undecano	C ₁₁ H ₂₄	gas	1 789.78	11 450.8	20 598	1 663.55	10 643.2	19 145
n-Undecano	C ₁₁ H ₂₄	líq.	1 776.32	11 364.7	20 443	1 650.09	10 557.0	18 990
n-Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	gas	1 947.23	11 432.2	20 564	1 810.48	10 620.4	19 120
n-Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	líq.	1 932.59	11 346.3	20 410	1 795.84	10 543.4	18 966
n-Tridecano	C ₁₃ H ₂₈	gas	2 104.67	11 416.5	20 536	1 957.40	10 617.6	19 099
n-Tridecano	C ₁₃ H ₂₈	líq.	2 089.85	11 330.6	20 382	1 941.58	10 531.8	18 945
n-Tetradecano	C ₁₄ H ₃₀	gas	2 262.11	11 402.9	20 512	2 104.32	10 607.5	19 081
n-Tetradecano	C ₁₄ H ₃₀	líq.	2 245.11	11 317.2	20 358	2 087.32	10 521.8	18 927
n-Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	gas	2 419.55	11 391.2	20 491	2 251.24	10 598.7	19 065
n-Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	líq.	2 401.37	11 305.6	20 337	2 233.06	10 513.2	18 911
n-Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	gas	2 577.00	11 380.9	20 472	2 398.17	10 591.1	19 052
n-Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	líq.	2 557.64	11 295.4	20 318	2 378.81	10 505.6	18 898
n-Heptadecano	C ₁₇ H ₃₆	gas	2 734.44	11 371.8	20 456	2 545.09	10 584.3	19 039
n-Heptadecano	C ₁₇ H ₃₆	líq.	2 713.90	11 286.4	20 302	2 524.55	10 498.9	18 886
n-Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	gas	2 891.88	11 363.7	20 441	2 692.01	10 578.3	19 028
n-Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	líq.	2 870.16	11 278.4	20 288	2 670.29	10 493.0	18 875
n-Nonadecano	C ₁₉ H ₄₀	gas	3 049.33	11 356.5	20 428	2 838.94	10 572.9	19 019
n-Nonadecano	C ₁₉ H ₄₀	líq.	3 028.43	11 271.2	20 275	2 816.04	10 487.7	18 865
n-Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	gas	3 206.77	11 350.0	20 416	2 985.86	10 568.1	19 010
n-Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	líq.	3 182.69	11 264.7	20 263	2 961.78	10 482.8	18 857

Figura D.14 Calores de combustión de algunos hidrocarburos. (Perry y Col., 2000)

109605 n-Hexadecano

Información sobre producto

Synonyms	Cetane
Fórmula empírica (según Hill)	$C_{16}H_{34}$
Fórmula química	$CH_3(CH_2)_{14}CH_3$
Número HS	2901 10 00
Número CE	208-878-9
Masa molar	226.44 g/mol
Número CAS	544-76-3

Datos químicos y físicos

Solubilidad en agua	(20 °C) insoluble
Punto de fusión	18 °C
Masa molar	226.44 g/mol
Densidad	0.77 g/cm ³ (20 °C)
Punto de ebullición	287 °C
Presión de vapor	< - 0.1 hPa (20 °C)
Temperatura de inflamabilidad	135 °C
Viscosidad cinemática	< - 7 mm ² /s (40 °C)

Figura D.15 Propiedades del n-hexadecano. (MERCK, 2010)

Formas: (1) $C_p^o = a + b(T) + c(T)^2 + d(T)^3$;

(2) $C_p^o = a + b(T) + c(T)^{-2}$.

Las unidades de C_p^o son J/(g mol)(K o °C).

Para convertir a cal/(g mol)(K o °C) = Btu/(lb mol)(°R o °F), multiplique por 0.2390.

Nota: $b \cdot 10^2$ significa que el valor de b se debe multiplicar por 10^{-2} ; p. ej., 20.10×10^{-2} para la acetona.

Compuesto	Fórmula	Peso mol.	Estado	Forma	T	a	b · 10 ²	c · 10 ⁵	d · 10 ⁹	Intervalo de temp. (en T)
Acetona	CH ₃ COCH ₃	58.08	g	l	°C	71.96	20.10	-12.78	34.76	0-1200
Acetaldehído	C ₂ H ₂	26.04	g	l	°C	42.43	6.053	-5.033	18.20	0-1200
Aire		29.0	g	l	°C	28.94	0.4147	0.3191	-1.965	0-1500
Amoniaco	NH ₃	17.03	g	l	K	28.09	0.1965	0.4799	-1.965	273-1800
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	132.15	g	l	°C	35.15	2.954	0.4421	-6.686	0-1200
Benceno	C ₆ H ₆	78.11	c	l	K	215.9				275-328
					K	-7.27329	77.054	-164.82	1,897.9	279-350
					°C	74.06	32.95	-25.20	77.57	0-1200
Isobutano	C ₄ H ₁₀	58.12	g	l	°C	89.46	30.13	-18.91	49.87	0-1200
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58.12	g	l	°C	92.30	27.88	-15.47	34.98	0-1200
Isobuteno	C ₄ H ₈	56.10	g	l	°C	82.88	25.64	-17.27	50.50	0-1200
Caruro de calcio	CaC ₂	64.10	c	2	K	68.62	1.19	-8.66 x 10 ¹⁰	—	298-720
Carbonato de calcio	CaCO ₃	100.09	c	2	K	82.34	4.975	-12.87 x 10 ¹⁰	—	273-1033
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	74.10	c	l	K	89.5				276-373
Óxido de calcio	CaO	56.08	c	2	K	41.84	2.03	-4.52 x 10 ¹⁰		10273-1173
Carbono	C	12.01	c	2	K	11.18	1.095	-4.891 x 10 ¹⁰		273-1373
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	g	l	°C	36.11	4.233	-2.887	7.464	0-1500
Monóxido de carbono	CO	28.01	g	l	°C	28.95	0.4110	0.3548	-2.220	0-1500
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153.84	l	l	K	12.285	0.01095	-318.26	3,425.2	273-343
Cloro	Cl ₂	70.91	8	l	°C	33.60	1.367	-1.607	6.473	0-1200
Cobre	Cu	63.54	c	l	K	22.76	0.06117			273-1357

Figura D.16 Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones. (Himmelblau, 1997)

óxido nítrico	NO	30.01	g	l	°C	29.50	0.8188	-0.2925	0.3652	0-3500
Nitrógeno	N ₂	28.02	g	l	°C	29.00	0.2199	0.5723	-2.871	0-1500
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	46.01	g	l	°C	36.07	3.97	-2.88	7.87	0-1200
Tetróxido de nitrógeno	N ₂ O ₄	92.02	g	l	°C	75.7	12.5	-11.3		0-300
Óxido nitroso	N ₂ O	44.02	g	l	°C	37.66	4.151	-2.694	10.57	0-1200
Oxígeno	O ₂	32.00	g	l	°C	29.10	1.158	-0.6076	1.311	0-1500
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	72.15	l	l	K	33.24	192.41	-236.87	17.944	270-350
Propano	C ₃ H ₈	44.09	g	l	°C	114.8	34.09	-18.99	42.26	0-1200
Propileno	C ₃ H ₆	42.08	g	l	°C	68.032	22.59	-13.11	31.71	0-1200
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	105.99	c	l	°C	59.580	17.71	-10.17	24.60	0-1200
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	286.15	c	l	K	121				288-371
	-10H ₂ O				K	535.6				298
Azufre	S	32.07	c [†]	l	K	15.2	2.68			273-368
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	98.08	c [‡]	l	K	18.5	1.84			368-392
Dióxido de azufre	SO ₂	64.07	g	l	°C	139.1	15.59			10-45
Trióxido de azufre	SO ₃	80.07	g	l	°C	38.91	3.904	-3.104	8.606	0-1500
Tolueno	C ₇ H ₈	92.13	l	l	°C	48.50	9.188	-8.540	32.40	0-1000
					K	1.8083	81.222	-151.27	1.630	270-370
Agua	H ₂ O	18.016	g	l	°C	94.18	38.00	-27.86	80.33	0-1200
					K	18.2964	47.212	-133.88	1,314.2	273-373
					°C	33.46	0.6880	0.7604	-3.593	0-1500

Figura D.16 (continuación) Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones. (Himmelblau, 1997)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACERINOX Y AMINOX (2010). “Trabajos en acero inoxidable. Catálogo” Zulia – Venezuela. Disponible en: <http://www.acerinoxfabricaciones.com/>
2. ALCALDE SAN MIGUEL, Pablo (2004). “Electrotecnia”. Editorial Thomson Editores Spain Paraninfo S.A. 4ª Edición. Madrid - España. Pág.: 131.
3. ASTM STANDARD C195 (2000). "Standard specification for mineral fiber thermal insulating cement" ASTM International. West Conshohocken – PA. DOI: 10.1520/C0195-00.
4. ASTM STANDARD C547 (2000). "Standard specification for mineral fiber pipe insulation" ASTM International. West Conshohocken – PA., DOI: 10.1520/C0547-00.
5. DICKERSON, R. W. Jr. (1969).”Thermal properties of foods”. Editorial AVI. Publi. Co. 4º Edición, Westport. Connecticut – EE.UU.
6. DUSSÁN-SARRIA, Saúl; HONÓRIO, Sylvio Luis (2005). “Parámetros de enfriamiento rápido de higo embalado en cajas de exportación” Revista UDO agrícola. Maturín – Venezuela. Año nº 5, Nº 1, 2005, págs. 96-102.
7. EARLE, R. L. (1998). “Ingeniería de los alimentos”. Editorial Acribia, S.A. 2ª edición. Zaragoza - España. Pág.: 45-62.
8. GIUGNI DE ALVARADO, Luz; ETTEDGUI de BETANCOURT, Corina; GONZÁLEZ de SALAMA, Ines; GUERRA, Venturina (2005). “Evaluación de proyectos de inversión”. 2ª edición. Clemente Editores C.A. Universidad de Carabobo. Valencia – Venezuela.

9. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ-COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, Pilar (2006). “Metodología de la investigación”. Editorial Mc GrawHill. 4ª edición. México. Pág. 597 – 603.
10. HERNÁNDEZ, María Teresa; JAÉN DE CASTILLO, Aura; TEJADA H., Luis A. (2006). “Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales”. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Caracas – Venezuela.
11. HIMMELBLAU, David (1997). “Principios básicos y cálculos en ingeniería química”. Editorial Prentice - Hall. 6º Edición. México D.F. – México. Pág. 448 – 449.
12. HOLMAN, J. P. (1999). “Transferencia de calor”. Compañía Editorial Continental, S.A. 10ª edición. México. Pág.: 17-36, 129-193.
13. IBARZ RIBAS, Alberto; BARBOSA CÁNOVAS, Gustavo V.; GARZA GARZA, Salvador; GIMENO AÑÓ, Vicente (2000). “Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria”. Editorial Acribia, S.A. 1ª edición. Zaragoza – España. Pág. 25-36, 59-63.
14. IMAI, Masaaki. (2001). “La clave de la ventaja competitiva japonesa”. Compañía Editorial Continental, S.A. 13ª edición. México.
15. INCROPERA, Frank; de WITT, David (1999). “Fundamentos de transferencia de calor”. Prentice hall. 4º Edición. México D.F. – México. Pág. 4–10, 73–99, 212–244, 858–859.
16. ISOVER (2002). “Manual de aislamiento en la industria”. Salvador Escoda S.A.
17. JP CALDERAS (2010). “Catalogo de productos”. Caracas – Venezuela. Disponible en: <http://www.jpcalderas.com/>
18. KASTIKA, Eduardo (2002). “Brainstorming o tormenta de ideas” Estr@tegia Magazine. Disponible en: <http://www.estrategiamagazine.com/marketing/>

19. LEVENSPIEL, Octave (1993). “Flujo de fluido e intercambio de calor”. Editorial Reverté S.A. 1ª edición en español. Barcelona – España. Pág. 161-178, 191-198, 203-223.
20. MANZANO CALAVERA, Carlos (2005). “Estación de enfriamiento para piezas planas”. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona – España.
21. MERCK CHEMICALS (2010). “n-Hexadecano”. Darmstadt – Alemania.
22. MONTEAGUDO YANES, José P.; PEREZ LANDIN, José J.; GUERRA FERNANDEZ, Eddy (1998). “Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor”. Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería Mecánica. Cienfuegos – Cuba.
23. MORA VANEGAS, Carlos (2008). “Torbellino de ideas”. Universidad de Carabobo. Área de estudios de Postgrado. Bárbula – Venezuela.
24. OJEDA, Ana (2002). “Estudio experimental del enfriamiento de un cuerpo”. Escuela de Educación Técnica N°3, Florencio Varela. Buenos Aires – Argentina.
25. PANDE, Peter; NEUMAN, Robert; CAVANAGH, Roland (2002). “Las claves de 6 Sigma”. Mc GrawHill, 1ª edición. Bogotá – Colombia. Pág. 360.
26. PERRY, Robert; GREEN, Don; MALONEY, James (2000). “Manual del ingeniero químico”. Editorial Mc GrawHill. 6º Edición. México.
27. Sociedad latinoamericana para la calidad (2000) “Diagrama causa y efecto”. Buenos Aires – Argentina.
28. TERUEL, Bárbara; KIECKBUSCH, Theo; CORTEZ, Luis; USBERTI, Fabio; LIMA, Antonio Gilson (2005). “Herramienta computacional para simulación de procesos de enfriamiento: Aplicación al estudio de enfriamiento de tomates con aire forzado”. Libro

de artículos en extenso del V congreso iberoamericano de alimentos puerto Vallarta, Jalisco, México, 4-7 septiembre de 2005. Tomo I, I-62.

29. TORRES DE FORZANTI, Liana. (2005). “Guía para la elaboración del plan de trabajo especial de grado”. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Bárbula – Venezuela.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases teóricas.....	10
CAPÍTULO III.....	31
3.1. Diagnóstico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L. ...	32
3.2. Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.....	33
3.3. Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.	39
3.4. Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.....	43
3.5. Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas.....	44
CAPÍTULO IV.....	50
4.1 Diagnostico a la línea de producción de colados de la procesadora Ezequiel Zamora R.L. ...	50
4.2 Identificación de los factores que influyen negativamente en el proceso de producción.....	55
4.3 Propuesta de mejoras técnicamente factibles de los factores que influyen en las pérdidas de energía del proceso de producción de colados.	64
4.4 Selección de la alternativa tecnológica más adecuada que reduzca las pérdidas de energía de la línea de producción de colados.....	82
4.5 Determinación de la factibilidad económica de las propuestas seleccionadas que se usarán para la mejora del proceso de producción de colados.	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
APÉNDICE A Cálculos típicos.....	92
APÉNDICE B Programación de la información.....	111
	141

APÉNDICE C Especificación de los equipos seleccionados	116
APÉNDICE D Tablas y figuras bibliográficas.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137