



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE
LA ESTACIÓN DE ENFRIAMIENTO PARA LÁMINAS
ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES EN LA LÍNEA DE
PRODUCCIÓN DE LA PLANTA EL INGA DE LA EMPRESA
CHOVA DEL ECUADOR S.A.

AUTOR: REYES BARRIGA, FAUSTO ANDRÉS

DIRECTOR: ING. POZO, JAVIER

CODIRECTOR: ING. LOZA, DAVID

SANGOLQUÍ

2015

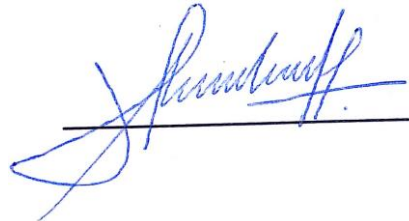
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ENFRIAMIENTO PARA LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA EL INGA DE LA EMPRESA CHOVA DEL ECUADOR S.A.**”, fue realizado en su totalidad por Fausto Andrés Reyes Barriga, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.



Ing. Javier Pozo

DIRECTOR



Ing. David Loza

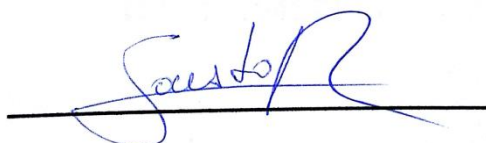
CODIRECTOR

Sangolquí, Abril del 2015

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**Yo, FAUSTO ANDRÉS REYES BARRIGA****DECLARO QUE:**

La tesis / proyecto de grado titulado **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ENFRIAMIENTO PARA LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA EL INGA DE LA EMPRESA CHOVA DEL ECUADOR S.A.”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros y conforme a las citas cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis / proyecto de grado en mención.



Fausto Andrés Reyes Barriga

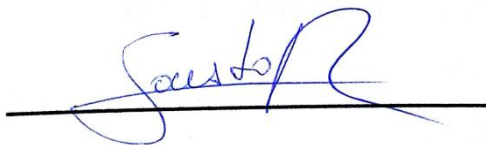
C.I.: 1715467435

Sangolquí, Abril del 2015

AUTORIZACIÓN

Yo, FAUSTO ANDRÉS REYES BARRIGA

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ENFRIAMIENTO PARA LÁMINAS ASFÁLTICAS IMPERMEABILIZANTES EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA EL INGA DE LA EMPRESA CHOVA DEL ECUADOR S.A.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son mi exclusiva responsabilidad y autoría.



Fausto Andrés Reyes Barriga

C.I.: 1715467435

Sangolquí, Abril del 2015

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres y hermana, quienes siempre han sido el pilar fundamental en mi vida.

A mis amigos por haber formado parte de esta etapa de mi vida.

Fausto Andrés Reyes Barriga

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermana por su apoyo incondicional, su confianza y su guía en todo momento.

Agradezco al Ingeniero Javier Pozo y al Ingeniero David Loza por su cooperación en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a Chova del Ecuador S.A. por ofrecerme esta gran oportunidad y a todo su personal por la colaboración brindada.

Fausto Andrés Reyes Barriga

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
LISTA DE ANEXOS	xii
NOMENCLATURA	xiii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 GENERAL	3
1.3.2 ESPECÍFICOS	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 ALCANCE	4
CAPITULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1 LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES	6
2.1.1 PROCESO DE LAMINACIÓN	6
2.2 ETAPA DE ENFRIAMIENTO	9
2.2.1 LÁMINAS AUTOPROTEGIAS	9
2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR	11
2.3.1 CONDUCCIÓN	12
2.3.1.1 RESISTENCIA TÉRMICA	14
2.3.1.2 ESTADO TRANSITORIO	15
2.3.2 CONVECCIÓN	20
2.3.2.1 FLUJO EXTERNO	22
2.3.3 RADIACIÓN	24

CAPÍTULO 3: DISEÑO	27
3.1 REQUERIMIENTOS Y EVALUACION DE PARAMETROS	27
3.2 DISEÑO TÉRMICO	29
3.2.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN h	32
3.2.2 LONGITUD MÍNIMA DE ENFRIAMIENTO	34
3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL	37
3.3.1 DETERMINACIÓN DE CARGAS	38
3.3.2 SIMULACIÓN	43
3.3.3 RESULTADOS	44
3.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS	48
3.4.1 JUNTAS EMPERNADAS	48
3.4.2 SISTEMA DE TRACCIÓN	61
3.4.2.1 MOTORREDUCTOR	62
3.4.2.2 SELECCIÓN DE PIÑONES	64
3.4.2.3 FLECHAS	66
3.4.2.4 SELECCIÓN DE CHUMACERAS	73
3.5 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO	75
3.5.1 INSTRUMENTACIÓN	75
3.5.2 CONTROL	75
3.5.3 SISTEMA ELÉCTRICO	76
3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERIAS	76
CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	77
4.1 PLANOS CONSTRUCTIVOS	77
4.2 CONSTRUCCIÓN	77
4.3 IMPLEMENTACIÓN	84
CAPÍTULO 5: PRUEBAS	88
5.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS	88
5.2 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN	88
5.3 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO	89
5.4 EVALUACION DE RESULTADOS	89
5.5 MANUAL DE FUNCIONAMIENTO	91

	viii
CAPÍTULO 6: ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO	92
6.1 ESTUDIO FINANCIERO	92
6.1.1 COSTO DE MATERIALES DIRECTOS	92
6.1.2 COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA	95
6.1.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO	96
6.2 ESTUDIO ECONÓMICO	96
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
7.1 CONCLUSIONES	101
7.2 RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Láminas impermeabilizantes con armadura	1
Figura 2 Solución preliminar nueva línea	4
Figura 3 Clasificación general de láminas impermeabilizantes	6
Figura 4 Línea de laminación con armaduras	8
Figura 5 Rodillo enfriado internamente	9
Figura 6 Convección, Conducción y Radiación	11
Figura 7 Transferencia unidimensional por conducción	12
Figura 8 Conductividad térmica para diversos estados de materiales	13
Figura 9 Resistencias térmicas en pared compuesta	15
Figura 10 Superficie de control general en resistencia interna despreciable	18
Figura 11 Sólido semiinfinito bajo convección superficial	19
Figura 12 Capa límite sobre una placa plana	20
Figura 13 Condición de no deslizamiento entre placas paralelas	20
Figura 14 Convección forzada y natural	21
Figura 15 Intercambio de radiación en una superficie	25
Figura 16 Esquema del enfriamiento de láminas	30
Figura 17 Longitud máxima disponible de enfriamiento	31
Figura 18 Esquema de sólido semiinfinito	34
Figura 19 Variación de la temperatura en función del tiempo	36
Figura 20 Longitud de bandejas de enfriamiento	37
Figura 21 Recorrido de lámina en las bandejas	37
Figura 22 Partes existentes laminadora	38
Figura 23 Estructura final	38
Figura 24 Fuerzas generadas en un rodillo	39
Figura 25 Apoyos de tolvas	40
Figura 26 Carro soporte de polietileno	42
Figura 27 Mallado de la estructura	43
Figura 28 Asignación de elementos, restricciones y cargas	44
Figura 29 Diagrama de esfuerzo	44
Figura 30 Columna empotrada – articulada	45
Figura 31 Juntas empernadas	48

	x
Figura 32 Junta empernada 1	49
Figura 33 Interacción de fuerzas cortantes en un perno	50
Figura 34 Efecto de M_y -y sobre la junta	51
Figura 35 Efecto de M_z -z sobre la junta	51
Figura 36 Análisis de fatiga	54
Figura 37 Junta empernada 2	56
Figura 38 Junta empernada 3	59
Figura 39 Rodillos de tracción	62
Figura 40 Esquema de conexión entre piñones	64
Figura 41 Flechas	66
Figura 42 Flecha1	67
Figura 43 Piñones A-B	67
Figura 44 Piñones C-D	68
Figura 45 Componentes de fuerzas en B y C	69
Figura 46 Interacción de fuerzas en Flecha1	70
Figura 47 Fuerzas en Plano YZ y XZ	70
Figura 48 Diagrama de momentos flectores plano y-z	71
Figura 49 Diagrama de momentos flectores plano x-z	71
Figura 50 Tipo de chumaceras	74
Figura 51 Bailarina	75
Figura 52 Blower	85
Figura 53 Motor 1	86
Figura 54 Motor 2	86
Figura 55 Estación de enfriamiento	87
Figura 56 Resultados de la prueba de enfriamiento	89
Figura 57 Mejora en la presentación del producto	90
Figura 58 Prueba de funcionamiento bailarina	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Temperaturas de laminación	7
Tabla 2	Valores de típicos de coeficientes de convección	22
Tabla 3	Requerimientos del cliente	27
Tabla 4	Matriz combinex fluido de enfriamiento	28
Tabla 5	Matriz de decisión fluido de enfriamiento	28
Tabla 6	Matriz combinex recipiente de enfriamiento	28
Tabla 7	Matriz de decisión recipiente de enfriamiento	29
Tabla 8	Análisis de columnas	47
Tabla 9	Análisis de vigas	47
Tabla 10	Propiedades perno ½"	52
Tabla 11	Motorreductor	63
Tabla 12	Piñones de tracción	66
Tabla 13	Cargas en chumaceras	74
Tabla 14	Chumaceras seleccionadas	74
Tabla 15	Materiales y herramientas	77
Tabla 16	Simbología para diagramas de flujo	80
Tabla 17	Elementos a implementar	85
Tabla 18	Costo de Materiales	92
Tabla 19	Costo de accesorios	94
Tabla 20	Costo de consumibles	95
Tabla 21	Costo de mano de obra directa	96
Tabla 22	Costo total del proyecto	96
Tabla 23	Producto no conforme	97
Tabla 24	Beneficio económico anual	98
Tabla 25	Análisis económico	99
Tabla 26	Índices económicos – financieros	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A

DATOS TÉCNICOS - ENCODER BCG05-K1KM01PP

ANEXO B

PLANOS ELÉCTRICOS

ANEXO C

PLANOS DE TUBERÍAS

ANEXO D

PLANOS CONSTRUCTIVOS DEL SISTEMA

ANEXO E

MONTAJE, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

ANEXO F

DATOS TÉCNICOS – BLOWER FPZ K11-MS-MOR

ANEXO G

REPORTES DE PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

ANEXO H

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición
W.F.	Factor de ponderación (Weighting Factor)
R.F.	Factor de calificación (Rating Factor)
u_{lmax}	Velocidad de laminación máxima
u_{lmin}	Velocidad de laminación mínima
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{agua}	Temperatura del agua
T_{lam}	Temperatura de laminación
T_f	Temperatura de película
σ	Constante de Stefan-Boltzman
b	Ancho medio de lámina
L_{max}	Longitud máxima por bandeja
L_{min}	Longitud mínima por bandeja
μ_{agua}	Viscosidad dinámica del fluido
ν_{agua}	Viscosidad cinemática del fluido
ρ_{agua}	Densidad del agua
k_{agua}	Coefficiente de conductividad térmica del agua
Pr_{agua}	Número de Prandtl del agua
ρ_{lam}	Densidad de la lámina asfáltica
k_{lam}	conductividad térmica de la lámina asfáltica
ϵ_{lam}	Emisividad de lámina asfáltica
C_{lam}	Calor específico de la lámina asfáltica
α_{lam}	Difusividad térmica de la lámina asfáltica
u_{agua}	Velocidad del agua
Re_c	Reynolds crítico
x_c	Longitud crítica
Re_{Lmax}	Número de Reynolds para la longitud máxima
Nu_n	Número de Nusselt para el caso n
h_n	Coefficiente de transferencia de calor por convección para cada caso n
Bi_n	Número de Biot para cada caso n
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
$T(o, t)$	Variación de la temperatura en el tiempo
te_n	Tiempo de enfriamiento para cada caso n
de_n	Distancia de enfriamiento para cada caso n
$m_{R\emptyset}$	Masa del rodillo con diámetro \emptyset mm
$P_{R\emptyset}$	Peso del rodillo con diámetro \emptyset mm
τ_{lam}	Resistencia a la tensión de la lámina asfáltica
$Csup_{R\emptyset}$	Carga que ejercen los rodillos superiores de diámetro \emptyset mm
$Cinf_{R\emptyset}$	Carga que ejercen los rodillos inferiores de diámetro \emptyset mm
m_{Tolx}	Masa de la tolva x , siendo x el número de tolva
d_{apoyox}	Distancia de apoyo para la tolva x , siendo x el número

	de tolva
C_{Tolx}	Carga lineal que ejerce la tolva x , siendo x el número de tolva
m_{motor}	Masa del motor
$m_{reductor}$	Masa del reductor
m_{bmotor}	Masa de la base del motor
$P_{apmotor}$	Peso que genera en el motor en cada apoyo
$H_{nivagua}$	Nivel del agua en las bandejas
P_{agua}	Presión que ejerce el agua
m_{hombre}	Masa de un hombre promedio
P_{hombre}	Presión que ejerce un hombre
m_{HDPE}	Masa del polietileno de alta densidad
m_{carro}	Masa del carro de polietileno
P_{aHDPE}	Peso por apoyo que ejerce el carro de polietileno con las bobinas
σ_{cr}	Esfuerzo crítico o esfuerzo máximo permisible
E	Módulo de elasticidad del material
I	Momento de inercia para las columnas
A_{sec}	Área de la sección
L_{col}	Longitud de la columna
δ_{crc}	Deflexión máxima permisible para columnas
FS	Factor de seguridad
σ_{col}	Esfuerzo generado en la columna
δ_{col}	Deflexión generada en la columna
δ	Relación entre la deflexión real y máxima permisible
S_y	Esfuerzo de fluencia del material
σ_{viga}	Esfuerzo generado en la viga
δ_{crv}	Deflexión máxima permisible para vigas
L_{viga}	Longitud de la viga
δ_{viga}	Deflexión en la viga
T_{Jx}	Torque generado en la junta empernada x , siendo x el número de la junta
My_{Jx}	Momento en torno al eje Y-Y para cada junta empernada x , siendo x el número de la junta
Mz_{Jx}	Momento en torno al eje Z-Z para cada junta empernada x , siendo x el número de la junta
Vy_{Jx}	Fuerza cortante en dirección del eje Y para cada junta empernada x , siendo x el número de la junta
Vz_{Jx}	Fuerza cortante en dirección del eje Z para cada junta empernada x , siendo x el número de la junta
V_{Jx}	Fuerza cortante para cada perno en la junta x , siendo x el número de la junta
V_{pJx}	Fuerza cortante resultante en el perno p de la junta x , siendo x el número de la junta y p el perno de análisis
d_{cpJx}	Distancia del centro de la junta empernada al centro del perno para cada junta x , siendo x el número de la junta

F_{TJx}	Fuerza generada por torsión para cada junta x , siendo x el número de la junta
$V_{TotalJ1}$	Fuerza cortante máxima en el perno de análisis de la junta x , siendo x el número de la junta
F_{MyJx}	Fuerza generada por el momento en torno a Y-Y para la junta x , siendo x el número de la junta
F_{MzJx}	Fuerza generada por el momento en torno a Z-Z para la junta x , siendo x el número de la junta
d_{zpJx}	Distancia en Z de la base de la placa al centro del perno p de la junta x , siendo x el número de la junta y p el perno de análisis
d_{ypJx}	Distancia en Y de la base de la placa al centro del perno p de la junta x , siendo x el número de la junta y p el perno de análisis
F_{MJx}	Fuerza total generada por los momentos para la junta x , siendo x el número de la junta
A_p	Área del perno
τ_{maxJx}	Esfuerzo cortante máximo para la junta x , siendo x el número de la junta
τ_{minJx}	Esfuerzo cortante mínimo para la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{maxJx}	Esfuerzo flector máximo para la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{minJx}	Esfuerzo flector mínimo para la junta x , siendo x el número de la junta
Se_p	Límite de resistencia a la fatiga corregido del perno
C_{cargaP}	Factor de carga del perno
$C_{tamanoP}$	Factor de tamaño del perno
C_{supP}	Factor de superficie del perno
C_{tempP}	Factor de temperatura del perno
C_{confP}	Factor de confiabilidad del perno
S_u_p	Resistencia última del perno
S_y_p	Resistencia a la fluencia del perno
σ_{anJx}	Esfuerzo flector alternativo nominal de la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{mnJx}	Esfuerzo flector medio nominal de la junta x , siendo x el número de la junta
τ_{anJx}	Esfuerzo cortante alternativo nominal de la junta x , siendo x el número de la junta
τ_{mnJx}	Esfuerzo cortante medio nominal de la junta x , siendo x el número de la junta
k_f	Factor de concentración por fatiga para esfuerzos flectores alternativos
k_{fm}	Factor de concentración por fatiga para esfuerzos flectores medios
k_{fs}	Factor de concentración por fatiga para esfuerzos cortantes alternativos

k_{fsm}	Factor de concentración por fatiga para esfuerzos cortantes medios
σ_{ajx}	Esfuerzo flector alternativo de la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{mjx}	Esfuerzo flector medio de la junta x , siendo x el número de la junta
τ_{ajx}	Esfuerzo cortante alternativo de la junta x , siendo x el número de la junta
τ_{mjx}	Esfuerzo cortante medio de la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{eqajx}	Esfuerzo flector alternativo equivalente de la junta x , siendo x el número de la junta
σ_{eqmjx}	Esfuerzo flector medio equivalente de la junta x , siendo x el número de la junta
F_{tMx}	Fuerza tangencial requerida por el motor x , siendo x el número de motor
m_{4k}	Masa de la lámina asfáltica 4K
m_{Rx}	Masa de los rodillos soportada por el motor , siendo x el número de motor
f_o	Factor, material del rodillo vs condiciones de la lámina
F_{Mx}	Fuerza total requerida por el motor x , siendo x el número de motor
η	Eficiencia del motor
P_{Mx}	Potencia total requerida por el motor x , siendo x el número de motor
m_{I3000}	Masa de la lámina asfáltica Imperpol 3000
$Rev_{R\phi}$	Revoluciones por minuto para el rodillo de diámetro ϕ mm
i_{xay}	Relación de transmisión entre el piñón y y x
Z_x	Número de dientes del piñón x
w_A	Velocidad de giro del piñón A
T_A	Torque generado en el piñón A
F_{cA}	Fuerza generada por la cadena en el piñón A
r_A	Radio de paso del piñón A
w_C	Velocidad de giro del piñón C
T_C	Torque generado en el piñón C
F_{cC}	Fuerza generada por la cadena en el piñón C
r_C	Radio de paso del piñón C
θ	Ángulo formado por componentes en X y Y de la fuerza de cadena
M_{maxF}	Momento máximo sobre la flecha
M_{minF}	Momento mínimo sobre la flecha
T_{maxF}	Torque máximo sobre la flecha
T_{minF}	Torque mínimo sobre la flecha
M_{anF}	Momento alternativo nominal sobre la flecha
M_{mnF}	Momento medio nominal sobre la flecha

T_{anF}	Torque alternativo nominal sobre la flecha
T_{mnF}	Torque medio nominal sobre la flecha
d_F	Diámetro de la flecha
P_D	Peso del rodillo en cada apoyo
SO	Factor de seguridad estático
C_E	Carga estática
C_D	Carga dinámica

RESUMEN

Chova del Ecuador, en busca del aumento de producción de láminas asfálticas impermeabilizantes, emprendió la construcción de una nueva línea de laminación en la planta de El Inga. Esta línea debe implementar los elementos de una laminadora que la empresa adquirió con anterioridad. Las etapas de enfriamiento y tracción que se desarrollan en el presente proyecto sirven para complementar la mencionada línea de producción. En la línea de laminación actual, la falta de enfriamiento genera producto no conforme e impide el aumento en la velocidad de laminación. La nueva línea necesita duplicar la producción, para lo que se adquirió una enrolladora con la capacidad deseada, no obstante, es necesario asegurar el enfriamiento para que esta funcione adecuadamente. El presente proyecto consta de dos estaciones, enfriamiento y tracción. La etapa de enfriamiento se divide en dos partes. La primera parte, mediante el contacto de la lámina con rodillos autoenfriados, se encarga de enfriar láminas con recubrimiento mineral y polietileno denominadas auto protegidas y la segunda, mediante la sumersión de la lámina en un sistema de bandejas intercaladas, se ocupa del enfriamiento de las láminas con recubrimiento de polietileno denominado sin autoprotección. La estación de tracción se compone un sistema de transmisión, el cual mediante rodillos, piñones y cadenas genera la velocidad requerida de 40 m/min.

PALABRAS CLAVE:

- **CHOVA DEL ECUADOR**
- **ENFRIAMIENTO DE LÁMINAS**
- **SISTEMA DE TRACCIÓN**
- **LÁMINAS ASFÁLTICAS**
- **LAMINADORA**

ABSTRACT

Seeking the increase of production of bitumen membranes, Chova del Ecuador, started the construction of a new production line at EL Inga's plant. This line must use the elements of a production line that the company acquired previously. The cooling and traction stages, developed in this project serve to complement the aforementioned production line. At the current line, the lack of cooling generates nonconforming product and prevents the increase in rolling speed. The new line needs to double production, for which a winder with the desired capacity was acquired; however, it is necessary to ensure cooling for it to work properly. This project has two stations, cooling and traction. The cooling step is divided into two parts. The first part, by the contact of the membrane with self-cooled rollers, cools sheets with mineral and polyethylene coating called self-protected bitumen membranes. The second one, by dipping the sheet in a system of intercalated trays, cools the polyethylene coated sheets. The traction station consists of a transmission system that with help of rollers, sprockets and chains, generates the required speed of 40 m/min.

KEYWORDS:

- **CHOVA DEL ECUADOR**
- **MEMBRANE COOLING**
- **TRACTION SYSTEM**
- **BITUMEN MEMBRANES**
- **PRODUCTION LINE**

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

En el capítulo actual se define el problema, justificación y objetivos de la etapa de enfriamiento en la nueva línea de producción de láminas impermeabilizantes en la empresa Chova del Ecuador.

1.1 ANTECEDENTES

Chova del Ecuador, empresa fundada en 1979, está comprometida con el desarrollo, investigación y fabricación de productos para la impermeabilización, la construcción y la vialidad.

Dentro de los productos para la impermeabilización se encuentran las láminas asfálticas, las cuales están compuestas de una mezcla de asfalto modificado con polímeros del tipo SBS y cargas minerales, como caolín y carbonato. Las láminas pueden o no contar con armadura de poliéster o fibra de vidrio, y el recubrimiento externo de las mismas varía entre: polietileno termofusible, gránulo mineral, foil de aluminio o arena (Ver Figura 1).



Figura 1 Láminas impermeabilizantes con armadura

Fuente: (IMPTEK, 2014)

La empresa cuenta con una línea de laminación localizada en la planta de Cashapamba, en la que se fabrican láminas impermeabilizantes con y sin

armadura. Debido al crecimiento que ha experimentado tanto en el mercado nacional como extranjero, Chova del Ecuador, desde inicios del 2014 ha empezado la implementación de dos nuevas líneas de laminación, una para láminas con armadura y una segunda para láminas sin armadura, ubicadas en la planta de El Inga.

Como parte de la inversión para la implementación de la nueva línea de laminación para láminas con armadura, Chova del Ecuador, adquirió hace algunos años una laminadora de marca Dr. Reiser proveniente de una empresa guayaquileña que permaneció poco tiempo en el mercado. La empresa pretende completar las etapas de esta línea, así como implementar sistemas de control para mejorar la calidad de producto y reducir la intervención manual en la producción.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la nueva línea de laminación para láminas con armadura se tiene concebido la producción de láminas autoprotegidas, con recubrimiento externo de gránulo mineral o arena, y láminas sin autoprotección, con recubrimiento externo solamente de polietileno. En el año 2014 se produjo un promedio de 72400 m² de láminas con armadura.

La actual línea de laminación no permite un aumento de producción, debido a que la etapa de enfriamiento de la línea es ineficiente. De esta etapa la lámina sale a una temperatura de 40°C ocasionando que el producto se adhiera consigo mismo en la etapa de enrollado (Bonilla, 2014).

Adicionalmente la enrolladora actual requiere de intervención manual lo que la limita a una velocidad de enrollado máxima de 20 m/min. Como solución a este problema en particular la empresa adquirió una enrolladora automatizada marca Boato, la cual duplica la velocidad de producción. Sin embargo, esto representa menor tiempo para enfriamiento y en base a pruebas preliminares se determinó que la temperatura externa de lámina en la entrada de la enrolladora no puede superar los 34°C para alcanzar la máxima velocidad de operación, que es 40 m/min.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar, construir e implementar la estación de enfriamiento para láminas asfálticas impermeabilizantes en la línea de producción de la planta el Inga de la empresa Chova del Ecuador S.A.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir la estructura de soporte para la estación de enfriamiento, conformada por dos sistemas independientes, tomando en cuenta que estas se acoplen adecuadamente al resto de estaciones de la nueva línea
- Diseñar y construir el sistema de enfriamiento para láminas no protegidas.
- Diseñar y construir la estructura para la implementación de la estación de tracción master, encargada de generar el movimiento necesario de la línea.
- Aplicar un plan de pruebas de funcionalidad.
- Realizar un estudio financiero y económico del proyecto.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La temperatura a la salida del enfriamiento en la línea actual de Cashapamba representa un problema al momento de enrollar el producto terminado. Esto genera producto inconforme que finalmente no podrá ser comercializado por la empresa, generando pérdidas significativas.

Implementar un tanque similar al actual en la nueva línea representaría un alto costo, debido a las dimensiones del mismo, así como un peligro para el personal de producción. Además su ineficiencia es un problema para el aumento de producción.

Es por esto que el presente proyecto pretende implementar una estación de enfriamiento que cuente con dos sistemas (Ver Figura 2), uno para cada tipo de lámina, mediante la implementación de un sistema conformado por

un juego de rodillos enfriados por agua para el enfriamiento de láminas autoprotegidas y diseñando y construyendo una estación de enfriamiento con agua para las láminas no protegidas.

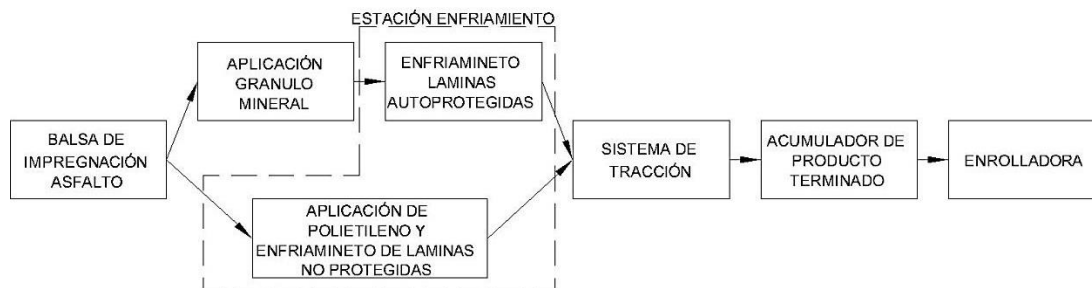


Figura 2 Solución preliminar nueva línea

1.5 ALCANCE

Se diseñará, construirá e implementará la estación de enfriamiento que cuenta de dos sistemas, uno para el enfriamiento de láminas con armadura autoprotegidas y otro para el enfriamiento de láminas con armadura sin autoprotección. Al igual que la estación de tracción máster.

Se realizará un protocolo de pruebas de funcionalidad con la finalidad de asegurarnos que las dos estaciones logren enfriar la lámina por debajo de la temperatura máxima de enrollado.

Se realizará un estudio económico y financiero del proyecto.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente proyecto se desarrolla en a lo largo de siete capítulos, los cuales se detallan brevemente a continuación:

Capítulo 1: objetivos, justificación y planteamiento del proyecto.

Capítulo 2: teoría necesaria para la resolución del presente proyecto, tanto para la etapa de diseño como para los requerimientos planteados.

Capítulo 3: evaluación de parámetros tomando en cuenta los requerimientos del cliente. Se diseñan los elementos necesarios para la construcción y montaje de la etapa de enfriamiento requerida en este proyecto.

Capítulo 4: se detalla la información requerida para la construcción, montaje e implementación del presente proyecto.

Capítulo 5: mediante pruebas se evalúa si se cumplen o no los requerimientos para el enfriamiento de láminas impermeabilizantes.

Capítulo 6: se realiza el estudio económico y financiero. Se toma en cuenta el costo total del proyecto y se evalúa el beneficio que se obtendrá con la implementación de esta etapa en comparación con la actual línea de laminación de la empresa.

Capítulo 7: se plantean las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPITULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A continuación se describe el proceso de producción, así como los requerimientos y los parámetros que deben ser considerados para la solución del presente problema.

2.1 LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES

Las láminas impermeabilizantes conformadas por asfalto modificado, armadura y recubrimiento externo tienen diversas aplicaciones en el campo de la construcción.

Chova del Ecuador comercializa y produce diversos tipos de láminas, como lo indica la Figura 3.

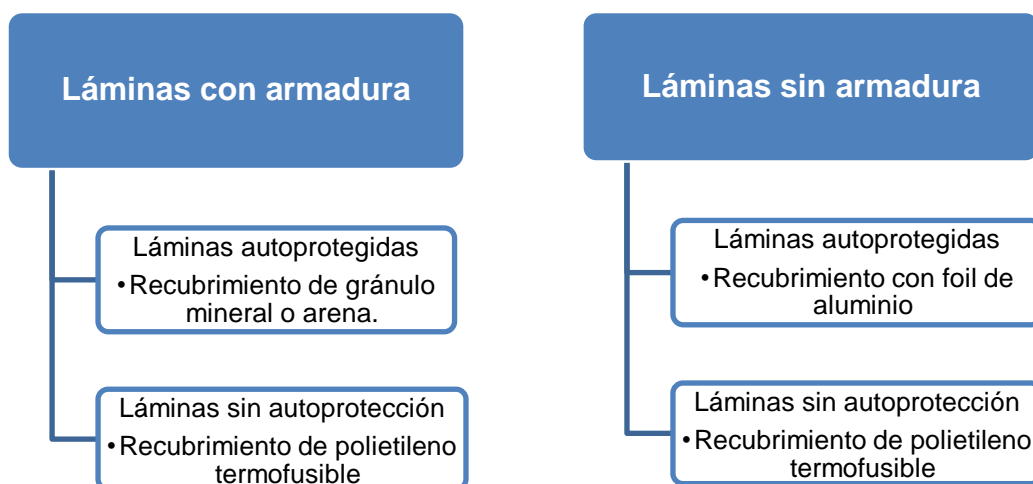


Figura 3 Clasificación general de láminas impermeabilizantes

2.1.1 PROCESO DE LAMINACIÓN

El proceso de laminación para los dos grupos de láminas comienza con la preparación del asfalto modificado, el cual es una mezcla de asfalto con polímeros del tipo SBS, que le dan a la mezcla la elasticidad característica. También, se añade caolín y carbonato, la cantidad de estos depende de cada producto. Cuando la temperatura de reblandecimiento¹ es la adecuada, se procede a bombear el asfalto modificado hacia la línea de laminación. La Figura 4 presenta las etapas de la línea de laminación con armaduras.

¹ Temperatura en la cual el asfalto modificado se hace lo suficientemente líquido para ser transportado por la tubería.

El asfalto modificado es bombeado hasta la balsa de impregnación, donde la armadura, que dependiendo del producto puede ser fibra de vidrio o poliéster, es empapada para posteriormente ser cubierta con gránulo mineral o arena y/o polietileno, según el caso. La Tabla 1 muestra las temperaturas teóricas para la laminación de cada producto ofertado por Chova del Ecuador.

Tabla 1

Temperaturas de laminación

LÁMINAS AUTOPROTEGIDAS	
PRODUCTO	TEMPERATURA DE LAMINACIÓN [°C]
Imperglass	140 - 160
Imperpol	140 - 160
LÁMINAS SIN AUTOPROTECCIÓN	
Techofielt	140 - 160
Super K	140 - 160

Fuente: (IMPTEK, 2014)

Para el caso de láminas autoprotegidas el enfriamiento es realizado por el contacto de la lámina con rodillos enfriados internamente por agua, mientras que para las láminas sin autoprotección el enfriamiento se logra sumergiendo la lámina en agua.

La lámina recorre la línea mediante la tracción generada por los rodillos motrices, ubicados en la estación de tracción máster para láminas sin autoprotección y adicionalmente con los rodillos superiores en la etapa de enfriamiento para láminas autoprotegidas. La lámina finalmente es enrollada según la longitud requerida para cada producto.

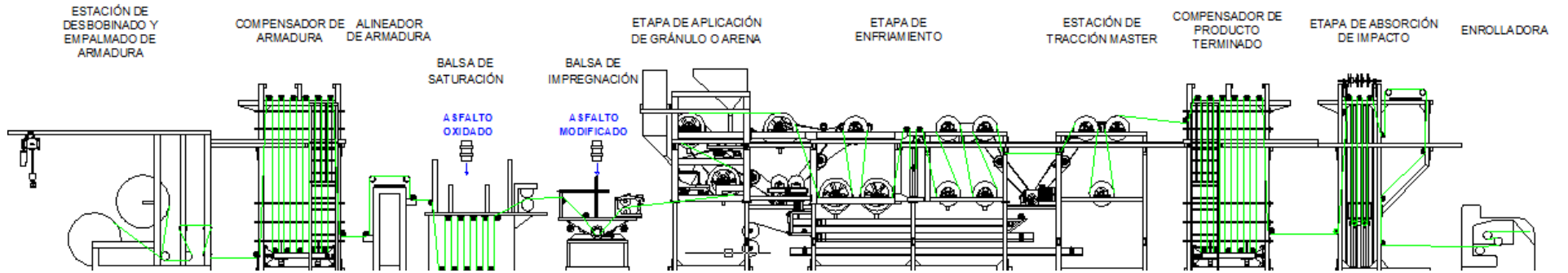


Figura 4 Línea de laminación con armaduras

Fuente: (IMPTEK, 2014)

2.2 ETAPA DE ENFRIAMIENTO

2.2.1 LÁMINAS AUTOPROTEGIAS

El recubrimiento de arena o gránulo mineral de las láminas autoprotegidas no puede ser humedecido, porque se provocaría la decoloración del mismo y por consiguiente la no conformidad del producto; razón por la cual las láminas se enfrían únicamente por el contacto con rodillos autoenfriados. Los rodillos que se ubican en la etapa de enfriamiento para láminas autoprotegidas fueron adquiridos con anterioridad por la empresa, de modo que el diseño de la etapa de enfriamiento contempla solamente la ubicación de los mismos y la eficacia de la misma será corroborada mediante pruebas. Así, en caso de ser necesario, posteriormente se agregarán elementos para enfriar el lado recubierto con polietileno mediante agua o aire. Ver Figura 5.

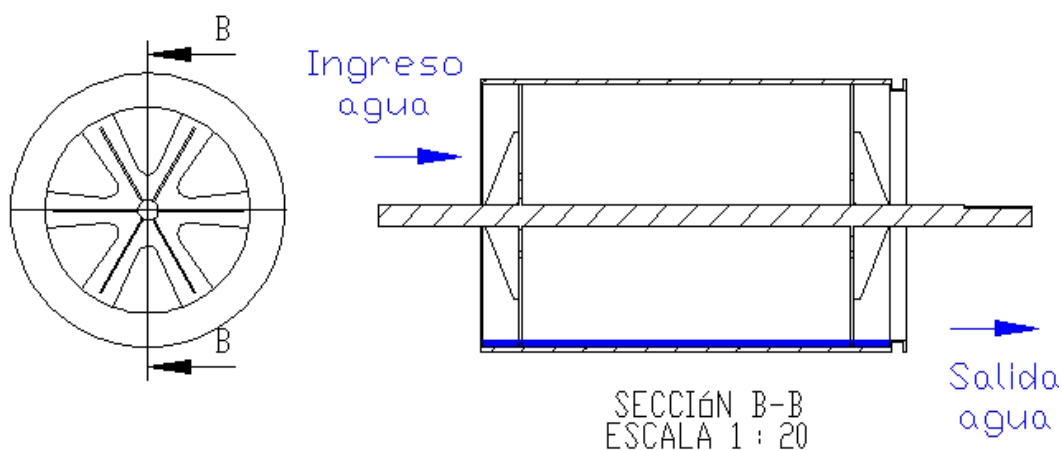


Figura 5 Rodillo enfriado internamente

2.2.2 LÁMINAS SIN AUTOPROTECCIÓN

Las láminas sin autoprotección presentan recubrimiento de polietileno el cual puede ser sumergido en el agua, requiriendo solamente una etapa de secado para su posterior enrollado. Adicionalmente, se recomienda “enfriar lo más rápido posible el polietileno después de que este entra en contacto con el asfalto modificado caliente, ya que así evitamos la fundición del mismo”. (Bonilla, 2014)

A continuación se presentan los parámetros a ser evaluados para la selección del fluido y la forma del recipiente para el enfriamiento.

Parámetros considerados para el fluido de enfriamiento:

- Eficacia
- Costo del sistema
- Costo de operación
- Durabilidad
- Costo de mantenimiento
- Ruido

En la planta actual de Cashapamba, la lámina es sumergida en una piscina de 5 metros de largo, 2 metros de ancho y 2.8 metros de profundidad. Se pretende mejorar este diseño tomando en cuenta los problemas que presenta la actual planta. En base a esto se consideró la opción de usar bandejas ubicadas de tal forma que permitan conseguir una mayor longitud en la que se sumerge la lámina.

Parámetros a ser evaluados para la forma del recipiente de enfriamiento:

- Longitud de enfriamiento
- Recirculación del fluido
- Seguridad
- Costo
- Tiempo de llenado
- Facilidad de operación
- Mantenimiento
- Facilidad de limpieza

Estos parámetros serán evaluados mediante matrices de decisión en la etapa de diseño.

En una matriz de decisión se evalúan los parámetros establecidos en función de factores de calificación (Rating Factors) así como factores de ponderación (Weighting Factors), los cuales se obtienen mediante una matriz combinex.

La matriz combinex permite ponderar los parámetros de decisión en función de su importancia para la toma de decisiones. Se usa valores de 1 para señalar al más importante, 0.5 igual de importante y 0 menos importante.

2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

La energía, calor o trabajo se puede transferir mediante las interacciones de un sistema con su alrededor. La termodinámica estudia los estados finales del proceso de interacción y no proporciona información respecto a la naturaleza o velocidad con que esto ocurre. La transferencia de calor amplía este análisis termodinámico, incluyendo los mecanismos de interacción, así como cálculos de la rapidez de transferencia de energía.

Es importante recordar que, “siempre que existe una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.” (Incropera & DeWitt, 1999)

En la Figura 6 se presentan los tres mecanismos de transferencia de calor los cuales pueden o no ser analizados en dependencia del tiempo.

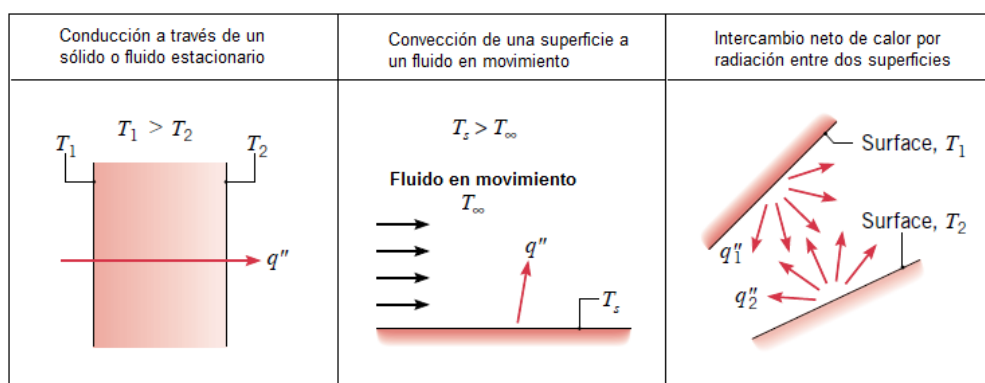


Figura 6 Convección, Conducción y Radiación

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

2.3.1 CONDUCCIÓN

La conducción es el mecanismo de transferencia de energía desde las partículas más energéticas a las menos energéticas debido a la interacción de las mismas.

La ecuación que nos permite cuantificar la cantidad de energía transferida por este mecanismo se conoce como ley de Fourier. Para una pared plana con una distribución de temperaturas $T(x)$, como la que se muestra en la Figura 7, la ecuación se expresa como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde:

$$q_x'' = \text{flujo de calor por unidad de área, } \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$\frac{dT}{dx} = \text{gradiente de temperatura, } \left[\frac{K}{m} \right]$$

$$k = \text{coeficiente de conductividad térmica, } \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

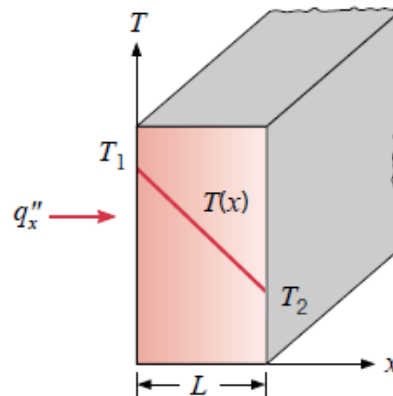


Figura 7 Transferencia unidimensional por conducción

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

El coeficiente de conductividad térmica es dependiente del material de la superficie, como se indica en la Figura 8, y el signo negativo de la ecuación se debe a que el calor se traslada en la dirección decreciente de la temperatura.

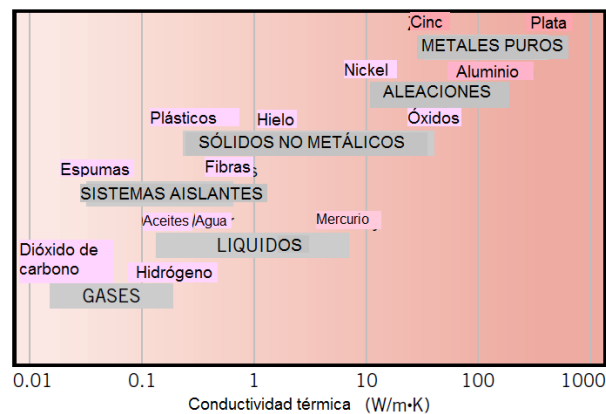


Figura 8 Conductividad térmica para diversos estados de materiales

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

Si se asume un gradiente de temperatura lineal, este puede ser reemplazado de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

De esta forma el flujo de calor por unidad de área es:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.3)$$

El calor transferido por conducción por unidad de tiempo, q_x es simplemente:

$$q_x = q_x'' * A \quad (2.4)$$

Tener en cuenta que el área, A , debe ser perpendicular a la dirección del gradiente de temperatura.

Las ecuaciones presentadas de conducción, son aplicables para condiciones unidimensionales de estado estable. “Lo de unidimensionales se refiere al hecho de que sólo se necesita una coordenada para describir la variación espacial de las variables dependientes”. (Incropera & DeWitt, 1999) Esto quiere decir que el gradiente de temperatura y la transferencia de calor se expresan en una sola e igual dirección. En cuanto a estado estable, se

refiere a un sistema en el que las temperaturas de cada punto son independientes del tiempo.

2.3.1.1 RESISTENCIA TÉRMICA

Es posible asociar una resistencia térmica con la conductividad de calor, definiendo a la resistencia como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente. De esta manera se obtiene que la resistencia térmica para la conducción, $R_{t\ Cond}$, es:

$$R_{t\ Cond} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (2.5)$$

De igual manera a partir de la ecuación 2.20 para la convección, se puede determinar una resistencia térmica para este mecanismo de transferencia.

$$R_{t\ Con} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (2.6)$$

Cuando una superficie está separada de sus alrededores por un gas, puede ser importante el intercambio de calor por radiación, por lo que es necesario establecer una resistencia térmica para radiación.

$$R_{t\ Rad} = \frac{T_s - T_\infty}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (2.7)$$

Donde h_r se determina a partir de la ecuación 2.33.

Definir todas las resistencias térmicas, permite simplificar el análisis para paredes compuestas y simples, y así determinar la transferencia unidimensional de calor como se muestra en la Figura 9.

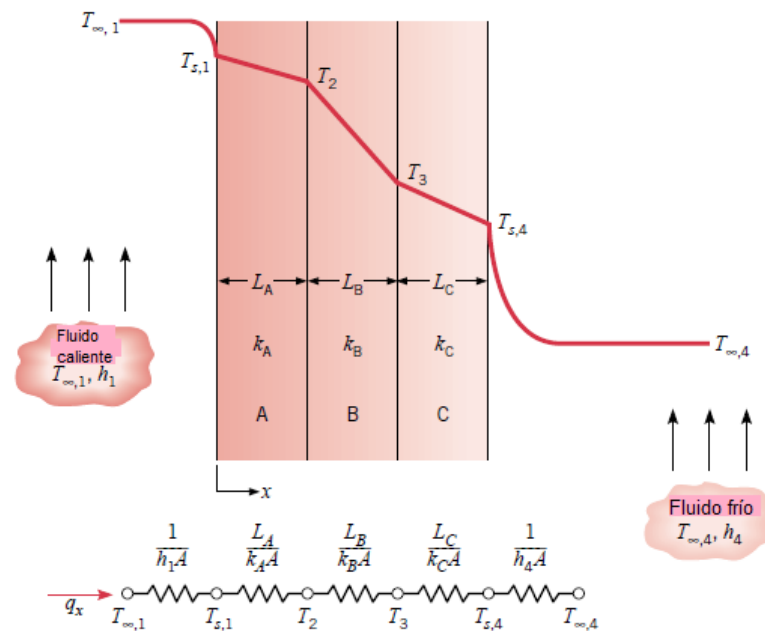


Figura 9 Resistencias térmicas en pared compuesta

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} \quad (2.8)$$

Es usual trabajar, para sistemas compuestos, con un coeficiente global de transferencia de calor U .

$$q_x = UA \Delta T \quad (2.9)$$

Siendo, $UA = 1/R_{total}$, y aplicando esto para la figura 9.

$$U = \frac{1}{R_{total}A} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{L_A}{k_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C}\right) + \left(\frac{1}{h_4}\right)\right]} \quad (2.10)$$

2.3.1.2 ESTADO TRANSITORIO

El estado transitorio es importante cuando en un sistema de transferencia de calor se requiere tener en cuenta la variación de las condiciones en función del tiempo. Esto es muy aplicable en casos de enfriamiento o calentamiento de superficies, donde es necesario determinar el tiempo que se requiere para llegar a la temperatura de los alrededores del sistema.

Cuando los gradientes de temperatura dentro del sólido son pequeños, se utiliza un método de análisis más sencillo, denominado resistencia interna despreciable. La esencia de este método es la suposición de que la temperatura del sólido es espacialmente uniforme en cualquier instante del proceso transitorio. Esta suposición elimina el gradiente de temperatura interno del sólido y el problema es ahora tratado mediante un balance global de energía. Este balance relaciona la velocidad de pérdida de calor en la superficie con la rapidez de cambio de la energía interna.

Para el caso de un sólido que se enfría en un medio, solo por convección, tenemos:

$$-\dot{E}_{s\grave{a}le} = \dot{E}_{alm} \quad (2.11)$$

$$-hA_s(T - T_\infty) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.12)$$

Donde:

$$\rho = \text{densidad del solido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$V = \text{volumen del solido} [m^3]$$

$$c = \text{calor especifico del sólido} \left[\frac{J}{kg K} \right]$$

$$A_s = \text{área superficial} [m^2]$$

Introduciendo las siguientes diferencias de temperatura

$$\theta \equiv T - T_\infty \quad (2.13)$$

$$\theta_i \equiv T_i - T_\infty \quad (2.14)$$

y teniendo en cuenta que $\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt}$ cuando T_∞ es constante, obtenemos

$$\frac{\rho V c}{h A_s} \frac{d\theta}{dt} \equiv -\theta \quad (2.15)$$

separando variables e integrando para las condiciones iniciales de $t = 0$ y $T(0) = T_i$, obtenemos:

$$\frac{\rho V c}{h A_s} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad (2.16)$$

La ecuación 2.16 sirve para determinar el tiempo requerido para que un sólido alcance una temperatura T .

Para usar este método es importante validar el número de Biot (Bi). Este número adimensional relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de calor por convección en la superficie del mismo.

De tal forma que si se cumple la ecuación 2.17, es posible despreciar el gradiente interno y por tanto es correcto usar el método de resistencia interna despreciable.

$$Bi = \frac{h L_c}{k} < 0.1 \quad (2.17)$$

Donde:

L_c = longitud característica del sólido [m]

De manera conservativa L_c , debe asociarse con la escala de longitud que corresponde a la diferencia máxima de temperaturas espaciales. “En consecuencia, para una pared plana de espesor $2L$ calentada (o enfriada) de forma simétrica, L_c permanecería igual a la mitad del espesor L .” (Incropera & DeWitt, 1999)

Se debe tomar en cuenta que este método permite analizar casos más complejos, donde no solo se tiene enfriamiento o calentamiento por convección como en la ecuación 2.12. En base a un balance de energías es posible incluir cualquier condición externa del sólido, como se muestra en la Figura 10, no obstante la solución de dichas ecuaciones puede volverse compleja de resolver matemáticamente.

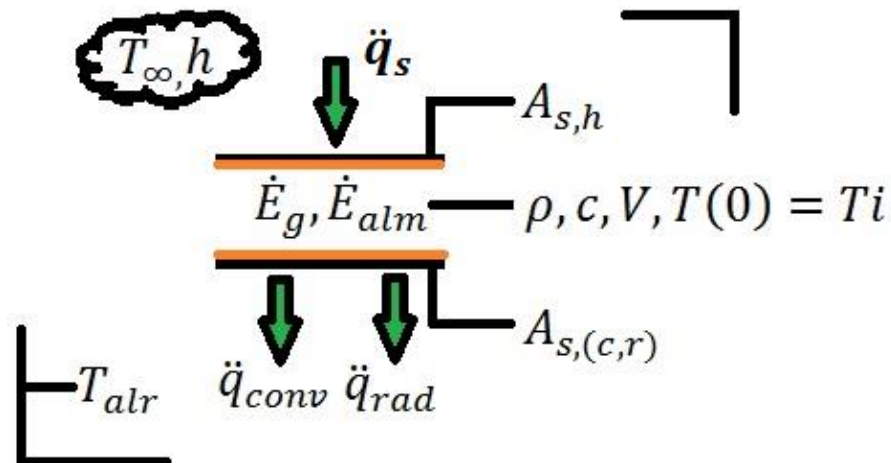


Figura 10 Superficie de control general en resistencia interna despreciable

Basado en: (Incropera & DeWitt, 1999)

Para este caso la ecuación 2.12 se expresa de la siguiente forma:

$$q_s'' A_{s,h} + \dot{E}_g - [h(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_{alr}^4)] A_{s,(c,r)} = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.18)$$

Donde:

$q_s'' A_{s,h}$ = calor externo hacia la superficie en un área $A_{s,h}$ [W]

\dot{E}_g = energía interna generada [W]

$[h(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_{alr}^4)] A_{s,(c,r)}$ = calor que escapa por mecanismos de convección y radiación. [W]

Cuando la condición $Bi < 0.1$ no se cumple, es posible emplear un análisis analítico basado en una geometría simple denominada sólido semiinfinito. “Tal sólido se extiende hasta el infinito en todas las direcciones excepto en una, por lo que se puede caracterizar por una sola superficie identificable.” (Incropera & DeWitt, 1999) Ya se han determinado soluciones para casos específicos, como el mostrado en la Figura 11.

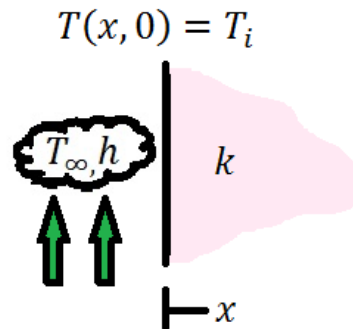


Figura 11 Sólido semiinfinito bajo convección superficial
Basado en: (Incropera & DeWitt, 1999)

La solución analítica para el caso mostrado se presenta en la ecuación 2.19, dicha ecuación es aplicable también para casos, donde el efecto de la radiación sea despreciable. Tomar en cuenta que en esta ecuación, el gradiente interno de temperatura no se desprecia, por lo que es posible evaluar el cambio de temperaturas en el tiempo, para cualquier valor x , dentro del sólido.

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_\infty - T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right)\right] \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right)\right] \quad (2.19)$$

Donde:

$T(x, t)$ = temperatura [K] evaluada para una profundidad y [m] del sólido en un tiempo t [s].

T_i = temperatura inicial del sólido, para un $t = 0$. [K]

T_∞ = temperatura del fluido, constante para todo tiempo t . [K]

erfc = función error complementaria = $1 - \operatorname{erf}$.

α = difusividad térmica del sólido $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

k = conductividad térmica del sólido $\left[\frac{W}{mK}\right]$

h = coeficiente de convección del fluido $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

2.3.2 CONVECCIÓN

El término convección es empleado cuando existe una diferencia de temperatura entre un fluido en movimiento y una superficie. Este modo de transferencia se compone de dos mecanismos que son: transferencia de energía debido al movimiento aleatorio de las moléculas y al movimiento global o macroscópico del fluido.

En la Figura 12 se muestra la interacción de un fluido sobre la superficie. A consecuencia de esta interacción se desarrolla una región en el fluido, en la que la velocidad varía desde cero en la superficie hasta un valor finito en el medio. Dicha región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica.

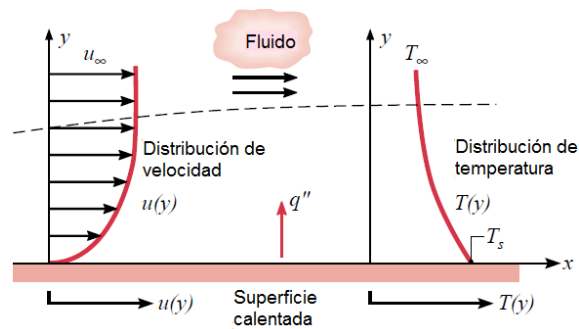


Figura 12 Capa límite sobre una placa plana

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

En el límite entre un sólido y un fluido, sus velocidades son iguales. A esto se lo denomina condición de no deslizamiento. Esto es aplicable en un flujo inducido entre una placa fija y una que se mueve como se observa en la siguiente figura.

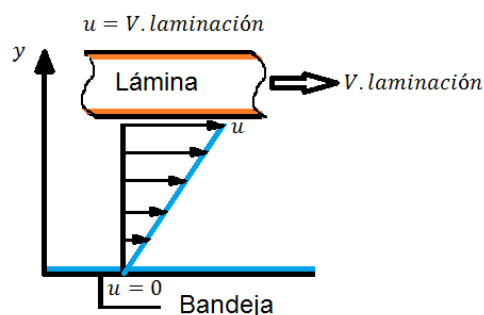


Figura 13 Condición de no deslizamiento entre placas paralelas

Basado en: (White, 2008)

La transferencia de calor por convección se clasifica en:

- **Convección forzada:** el flujo es causado por medios externos como un ventilador, una bomba, etc.
- **Convección natural:** el flujo es generado por diferencias de densidad. Esto es causado por diferencias de temperatura, por lo que el fluido más caliente y menos denso circula hacia arriba, mientras que el frío y más denso hacia abajo

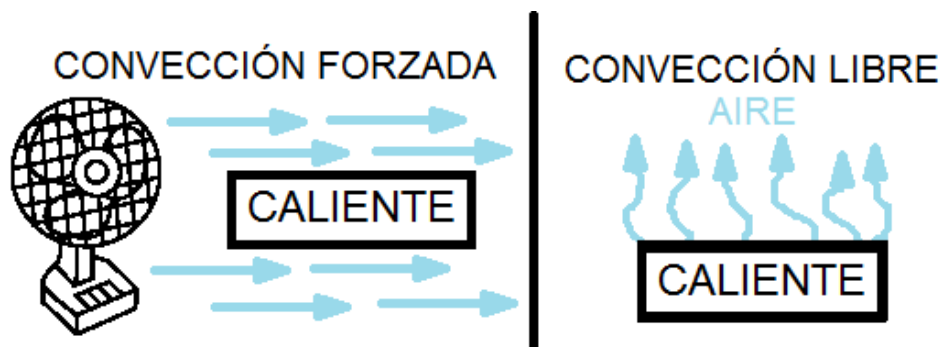


Figura 14 Convección forzada y natural

La siguiente ecuación, aplicada para la convección, se conoce como Ley de enfriamiento de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.20)$$

Donde:

q'' = flujo de calor por unidad de área, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

T_s = temperatura de la superficie, $[K]$

T_∞ = temperatura del fluido, $[K]$

h = coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, así como de condiciones como: velocidad, temperatura, estado, etc. Algunos rangos de valores típicos para algunos fluidos se listan en la Tabla 2.

Tabla 2
Valores de típicos de coeficientes de convección

PROCESO	h (W/m ² K)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100000

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

2.3.2.1 FLUJO EXTERNO

Lo más complicado en los problemas de convección es determinar el coeficiente de transferencia de calor h .

Hay ecuaciones dadas para casos puntuales de análisis. Esto simplifica considerablemente la resolución de problemas.

El primer paso en el tratamiento de cualquier problema de convección es determinar si el flujo es laminar o turbulento. Para esto se debe calcular el número de Reynolds, que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas del fluido.

$$Re = \frac{u_{\infty} L}{\nu} = \frac{\rho u_{\infty} L}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.21)$$

Donde:

$$u_{\infty} = \text{velocidad del fluido} \left[\frac{m}{s} \right]$$

L = longitud característica de la superficie, en caso de placas planas esta es la longitud total paralela al fluido. [m]

$$\nu = \text{viscosidad cinemática del fluido} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$\mu = \text{viscosidad dinámica del fluido} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

Al evaluar este número y si para placas planas con flujo paralelo se obtiene que $Re < Re_c = 5 \times 10^5$, se considera que el flujo es laminar y en caso contrario turbulento.

Todos los datos obtenidos para el fluido deben ser evaluados en la denominada temperatura de película T_f , la cual representa la media entre la temperatura del fluido y la superficie.

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (2.22)$$

Para determinar un coeficiente promedio de convección es necesario evaluar otros números adimensionales, como son el número de Nusselt (Nu) y el número de Prandtl (Pr). El primero representa el gradiente de temperatura en la superficie y provee una medida para el coeficiente de convección, y el segundo define el espesor relativo entre la capa límite de velocidad y térmica e indica el cociente entre la viscosidad y la difusividad térmica.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.23)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.24)$$

Donde:

L = longitud característica de la superficie [m]

k = coeficiente de conductividad térmica del fluido $\left[\frac{W}{m K} \right]$

c_p = calor específico del fluido $\left[\frac{J}{kg K} \right]$

α = difusividad térmica del fluido $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

Para un caso puntual de flujo externo paralelo sobre placas planas, es posible determinar un coeficiente de convección promedio para el fluido, tanto para flujos laminares, turbulentos y mixtos.

Flujo laminar

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hL}}{k} = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}, 0.6 \leq Pr \leq 50, 0.95 \leq \frac{x_c}{L} \leq 1 \quad (2.25)$$

Flujo turbulento

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hL}}{k} = 0.0296Re^{4/5}Pr^{1/3}, 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (2.26)$$

Flujo mixto

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hL}}{k} = (0.037Re_c^{4/5} - Y)Pr^{1/3}, 0.6 \leq Pr \leq 60, \frac{x_c}{L} \leq 0.95, \quad Re_L \leq 10^8 \quad (2.27)$$

Donde:

$$x_c = \text{longitud crítica [m], para cuando } Re = Re_c = 5 \times 10^5$$

$$Y = 0.037Re_c^{4/5} - 0.664Re_c^{1/2} = 871$$

2.3.3 RADIACIÓN

El último mecanismo de transferencia es la radiación térmica, la cual es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita en forma de ondas electromagnéticas.

La ecuación de Stefan-Boltzman establece la potencia emisiva de una superficie.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.28)$$

Donde:

$$E_b = \text{potencia emisiva superficial emitida por un cuerpo negro } \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$\sigma = \text{constant de Stefan-Boltzman} = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

$$T_s = \text{temperatura absoluta de la superficie [K]}$$

La ecuación 2.27 es aplicada para superficies denominadas radiador ideal o cuerpo negro, que emiten toda la energía que reciben. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor a la de un cuerpo negro y este flujo está determinado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.29)$$

Donde:

E = potencia emisiva superficial emitida por un cuerpo gris [$\frac{W}{m^2}$]

ε = emisividad de la superficie, [$0 \leq \varepsilon \leq 1$]

La radiación también puede ser originada desde una fuente y esta puede incidir en una superficie. La velocidad con la que esta energía radiante incide sobre una superficie se denomina irradiación (G). Figura 15.

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.30)$$

Donde:

α = absorvidad, [$0 \leq \alpha \leq 1$]

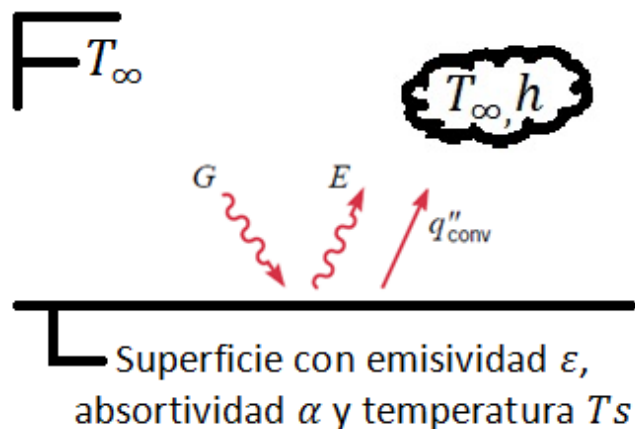


Figura 15 Intercambio de radiación en una superficie

Basado en: (Incropera & DeWitt, 1999)

Para una superficie en la que $\varepsilon = \alpha$, la velocidad neta de transferencia de calor por conducción es:

$$q_{rad}'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (2.31)$$

Esta ecuación proporciona la diferencia entre la energía que se libera por emisión y la que se gana por absorción.

Este intercambio neto de calor se puede expresar de la siguiente forma:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr}) \quad (2.32)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{alr}) (T_s^2 + T_{alr}^2) \quad (2.33)$$

Donde:

$$h_r = \text{coeficiente de transferencia de calor por radiación} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Resumen del capítulo:

En el proceso de laminación para láminas impermeabilizantes se requiere de un enfriamiento eficaz que permita reducir la temperatura desde los 160 °C hasta los 34 °C. En el diseño de esta etapa se considerará un análisis transitorio, puesto que la temperatura de la lámina varía conforme el tiempo. Mediante el análisis transitorio se podrá determinar la distancia de enfriamiento necesaria para que la velocidad de laminación sea la máxima.

CAPÍTULO 3: DISEÑO

En este capítulo se realizan los cálculos correspondientes para el dimensionamiento y selección de los elementos necesarios para las etapas de enfriamiento y tracción, todo esto en función de los requerimientos del cliente.

3.1 REQUERIMIENTOS Y EVALUACION DE PARAMETROS

En la Tabla 3 se resumen los requerimientos generales indicados por Chova del Ecuador.

Tabla 3

Requerimientos del cliente

Descripción	Requerimiento
Requerimientos generales para la estructura	Desmontable. Emplear elementos existentes.
Sistema de enfriamiento para láminas asfálticas	Temperatura externa menor a los 34°C en la etapa de enrollado.
Sistema de tracción	Velocidad de laminación: 40 m/min.

En el capítulo anterior se detallaron los parámetros tanto para la selección del fluido de enfriamiento como para forma del recipiente.

A continuación se presentan las matrices de decisión respectivas para evaluar dichos parámetros. Las Tablas 4 y 5 presentan la matriz combimex y la matriz de decisión, respectivamente, para el fluido de enfriamiento, mientras que las Tablas 6 y 7 para la forma del recipiente.

Para el caso del fluido se consideran las opciones de agua y aire, mientras que para la forma del recipiente se toman en cuenta las disposiciones de piscina (actual) y bandejas.

MATRIZ DE DECISIÓN: FLUIDO DE ENFRIAMIENTO

Tabla 4

Matriz combinex fluido de enfriamiento

No	Parámetros	1	2	3	4	5	6	7	Puntaje	W.F.
1	Eficacia	0	1	1	1	1	1	1	6	0.29
2	Costo del sistema		0	0.5	1	1	1	1	4.5	0.21
3	Costo de operación		0.5	0	1	1	1	1	4.5	0.21
4	Durabilidad				0	1	1	1	3	0.14
5	Costo de mantenimiento					0	1	1	2	0.10
6	Ruido						0	1	1	0.05
	Suma								21	1.00

Tabla 5

Matriz de decisión fluido de enfriamiento

No	Parámetros	W.F.	AGUA		AIRE	
			R.F.	Puntaje	R.F.	Puntaje
1	Eficacia	0.29	9	2.57	6	1.71
2	Costo del sistema	0.21	9	1.93	4	0.86
3	Costo de operación	0.21	8	1.71	6	1.29
4	Durabilidad	0.14	8	1.14	8	1.14
5	Costo de mantenimiento	0.10	8	0.76	7	0.67
6	Ruido	0.05	10	0.48	5	0.24
	Suma	1.00		8.60		5.90

MATRIZ DE DECISIÓN: FORMA DE RECIPIENTE PARA EL ENFRIAMIENTO

Tabla 6

Matriz combinex recipiente de enfriamiento

No	Parámetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Puntaje	W.F.
1	Longitud de enfriamiento	0	0.5	1	1	1	1	1	1	1	7.5	0.21
2	Recirculación del fluido	0.5	0	1	1	1	1	1	1	1	7.5	0.21
3	Seguridad			0	1	1	1	1	1	1	6	0.17
4	Costo				0	1	1	1	1	1	5	0.14
5	Tiempo de llenado					0	1	1	1	1	4	0.11
6	Facilidad de operación						0	1	1	1	3	0.08
7	Mantenimiento							0	1	1	2	0.06
8	Facilidad de limpieza								0	1	1	0.03
	Suma										36	1.00

Tabla 7

Matriz de decisión recipiente de enfriamiento

No	Parámetros	W.F.	BANDEJAS		PISCINA	
			R.F.	Puntaje	R.F.	Puntaje
1	Longitud de enfriamiento	0.21	10	2.08	8	1.67
2	Recirculación del fluido	0.21	9	1.88	6	1.25
3	Seguridad	0.17	10	1.67	4	0.67
4	Costo	0.14	8	1.11	5	0.69
5	Tiempo de llenado	0.11	9	1.00	5	0.56
6	Facilidad de operación	0.08	8	0.67	6	0.50
7	Mantenimiento	0.06	8	0.44	6	0.33
8	Facilidad de limpieza	0.03	8	0.22	5	0.14
	Suma	1.00		9.07		5.81

Se decide que el fluido de enfriamiento es agua dispuesta en bandejas.

3.2 DISEÑO TÉRMICO

En la etapa de enfriamiento para láminas sin autoprotección se necesita determinar la longitud de enfriamiento necesaria para que la temperatura externa de la lámina se reduzca a menos de los 34°C en el enrollado. En función de la longitud de enfriamiento se podrá determinar el tamaño y cantidad de bandejas requeridas.

Se conocen la longitud máxima disponible para cada bandeja (ver Figura 17), la velocidad máxima y mínima de laminación y la temperatura de laminación, que representa la temperatura inicial de la lámina. También se asume una temperatura ambiente promedio y se asigna el mismo valor para el agua.

Los cálculos a continuación se basan en la lámina más gruesa producida, la cual se denomina 4K con un espesor máximo de 4.2 mm. La Figura 16 muestra un esquema sobre la resolución de problema.

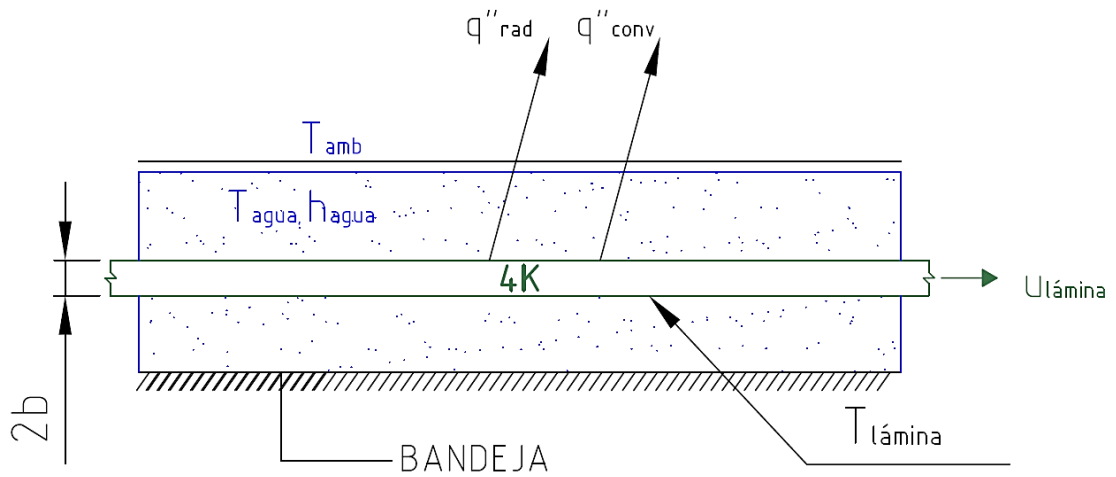


Figura 16 Esquema del enfriamiento de láminas

Datos:

$$u_{lmax} = 40 \frac{m}{min} = 0.667 \frac{m}{s} \quad u_{lmin} = 6.67 \frac{m}{min} = 0.111 \frac{m}{s}$$

$$T_{amb} = 22^{\circ}C = 295.15K$$

$$T_{agua} = 22^{\circ}C = 295.15K$$

$$T_{lam} = 160^{\circ}C = 433.15K$$

$$T_f = \frac{T_{agua} + T_{lam}}{2} = 364.15K$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$b = \frac{4.2}{2} \cdot mm = 2.1 \times 10^{-3} m$$

$$L_{max} = 6.75 m \quad L_{min} = 0 m$$

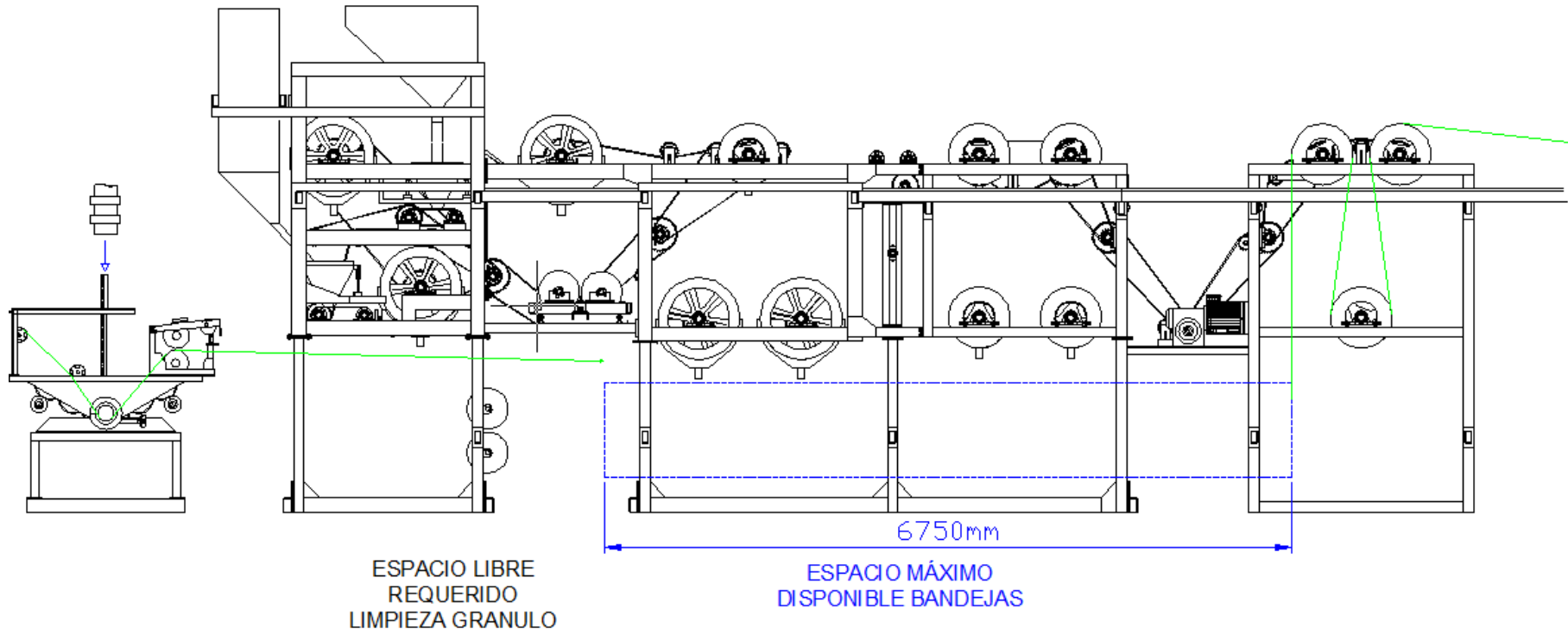


Figura 17 Longitud máxima disponible de enfriamiento

Propiedades del agua a T_f (364.15 K) (Incropera & DeWitt, 1999)

$$\mu_{\text{agua}} = 306 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1.03810^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{\text{agua}} = \frac{\mu_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = 2.948 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k_{\text{agua}} = 677 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$\text{Pr}_{\text{agua}} = 1.91$$

Propiedades de la lámina (IMPTEK, 2014)

$$\rho_{\text{lam}} = 1238 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\text{lam}} = 0.75 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$\varepsilon_{\text{lam}} = 0.92$$

$$C_{\text{lam}} = 920 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\alpha_{\text{lam}} = \frac{k_{\text{lam}}}{\rho_{\text{lam}} \cdot C_{\text{lam}}} = 6.585 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

3.2.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN h

De acuerdo al capítulo 2, lo primero en un problema de transferencia de calor es determinar el coeficiente de convección. Para esto lo primero es determinar la naturaleza del flujo, es decir, si es laminar o turbulento, para hacerlo se usa la ecuación 2.21.

No obstante, para emplear dicha ecuación, debemos tener la longitud de la lámina en contacto con el agua, dado que este no es el caso se procede a realizar los cálculos considerando la longitud máxima disponible, ya que así

obtendremos el promedio de valores desde 0 hasta esta longitud para el coeficiente de convección.

Los cálculos a continuación son realizados en función de la velocidad máxima de laminación, tener en cuenta que de acuerdo a la condición de no deslizamiento podemos concluir que:

$$u_{\text{agua1}} = u_{1\text{max}}$$

Determinación de la longitud crítica (x_c):

$$Re_c = 5 \times 10^5$$

$$x_{c1} = \frac{Re_c \cdot v_{\text{agua}}}{u_{\text{agua1}}} = 0.22 \text{ m}$$

Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), para la longitud máxima de 6.75 m.

$$Re_{L_{\text{max1}}} = \frac{u_{\text{agua1}} \cdot L_{\text{max}}}{v_{\text{agua}}} = 1.526 \times 10^7$$

$$\frac{x_{c1}}{L_{\text{max}}} = 0.033$$

Dado que este valor cumple con $Re_L \leq 10^8$ y $\frac{x_c}{L} \leq 0.95$ se emplea la ecuación 2.27.

$$Y = 0.037 \cdot Re_c^{\frac{4}{5}} - 0.664 \cdot Re_c^{\frac{1}{2}} = 871.32$$

$$Nu_1 = \left(0.037 \cdot Re_{L_{\text{max1}}}^{\frac{4}{5}} - Y \right) \cdot Pr_{\text{agua}}^{\frac{1}{3}} = 2.455 \times 10^4$$

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot k_{\text{agua}}}{L_{\text{max}}} = 2.463 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

3.2.2 LONGITUD MÍNIMA DE ENFRIAMIENTO

En la siguiente resolución se considera que:

- La temperatura del panel es uniforme en cualquier instante.
- La resistencia térmica del recubrimiento externo de polietileno en la lámina es insignificante.
- Las propiedades tanto del fluido como del medio son constantes.

Para determinar la distancia mínima de enfriamiento es necesario primero evaluar el número de Biot (Bi), y así emplear la ecuación adecuada.

$$Bi_1 = \frac{h_1 \cdot b}{k_{lam}} = 6.89$$

Dado que $Bi_1 > 0.1$, se emplea la ecuación 2.19 para evaluar la variación de la temperatura en función del tiempo. (Figura 18)

La ecuación 2.19 no incluye la pérdida de calor por radiación, para asumir esto se debe evaluar el valor h_r (Ecuación 2.33) correspondiente y compararlo con el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h_r = \varepsilon_{lam} \cdot \sigma \cdot (T_{lam} + T_{agua}) \cdot (T_{lam}^2 + T_{agua}^2) = 10.437 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\%Rad = 100 \frac{h_r}{h_1} = 0.42\%$$

El coeficiente de radiación representa menos del 1% del de convección, por lo que se puede despreciar el efecto de la radiación y la ecuación 2.19 es aplicable.

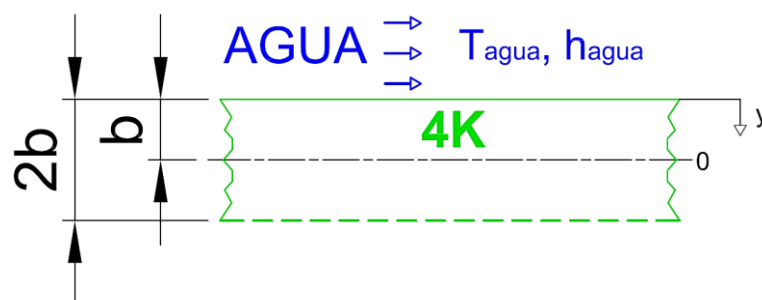


Figura 18 Esquema de sólido semiinfinito

La ecuación para evaluar la temperatura de la superficie ($y = 0$) es:

$$\frac{T_1(0, t) - T_{lam}}{T_{agua} - T_{lam}} = \operatorname{erfc}(0) - \left(\exp\left(0 + \frac{h_1^2 \cdot \alpha_{lam} \cdot t}{k_{lam}^2}\right) \right) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left[0 + \frac{h_1 \cdot (\alpha_{lam} \cdot t)^{0.5}}{k_{lam}}\right] \right]$$

$$T_1(0, t) = \left[1 - \left(\exp\left(\frac{h_1^2 \cdot \alpha_{lam} \cdot t}{k_{lam}^2}\right) \right) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left[\frac{h_1 \cdot (\alpha_{lam} \cdot t)^{0.5}}{k_{lam}}\right] \right] \right] \cdot (T_{agua} - T_{lam}) + T_{lam} \quad (3.1)$$

Se hace el mismo análisis, pero considerando ahora la velocidad mínima de laminación.

$$u_{lmin} = 6.67 \frac{m}{min} = 0.111 \frac{m}{s}$$

Se obtienen así los siguientes valores:

$$x_{c2} = \frac{Re_c \cdot v_{agua}}{u_{agua2}} = 1.326m$$

$$Re_{Lmax2} = \frac{u_{agua2} \cdot L_{max}}{v_{agua}} = 2.545 \times 10^6$$

$$Nu_2 = \left(0.03 Re_{Lmax2}^{\frac{4}{5}} - Y \right) \cdot Pr_{agua}^{\frac{1}{3}} = 5.035 \times 10^3$$

$$h_2 = \frac{Nu_2 \cdot k_{agua}}{L_{max}} = 505.006 \frac{W}{m^2 K}$$

$$Bi_2 = \frac{h_2 \cdot b}{k_{lam}} = 1.414$$

De igual forma se obtiene la ecuación 3.2:

$$\frac{T_2(0, t) - T_{lam}}{T_{agua} - T_{lam}} = \operatorname{erfc}(0) - \left(\exp\left(0 + \frac{h_2^2 \cdot \alpha_{lam} \cdot t}{k_{lam}^2}\right) \right) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left[0 + \frac{h_2 \cdot (\alpha_{lam} \cdot t)^{0.5}}{k_{lam}}\right] \right]$$

$$T_2(0, t) = \left[1 - \left(\exp\left(\frac{h_2^2 \cdot \alpha_{lam} \cdot t}{k_{lam}^2}\right) \right) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left[\frac{h_2 \cdot (\alpha_{lam} \cdot t)^{0.5}}{k_{lam}}\right] \right] \right] \cdot (T_{agua} - T_{lam}) + T_{lam} \quad (3.2)$$

En la Figura 19 se muestra la solución de las ecuaciones 3.1 y 3.2

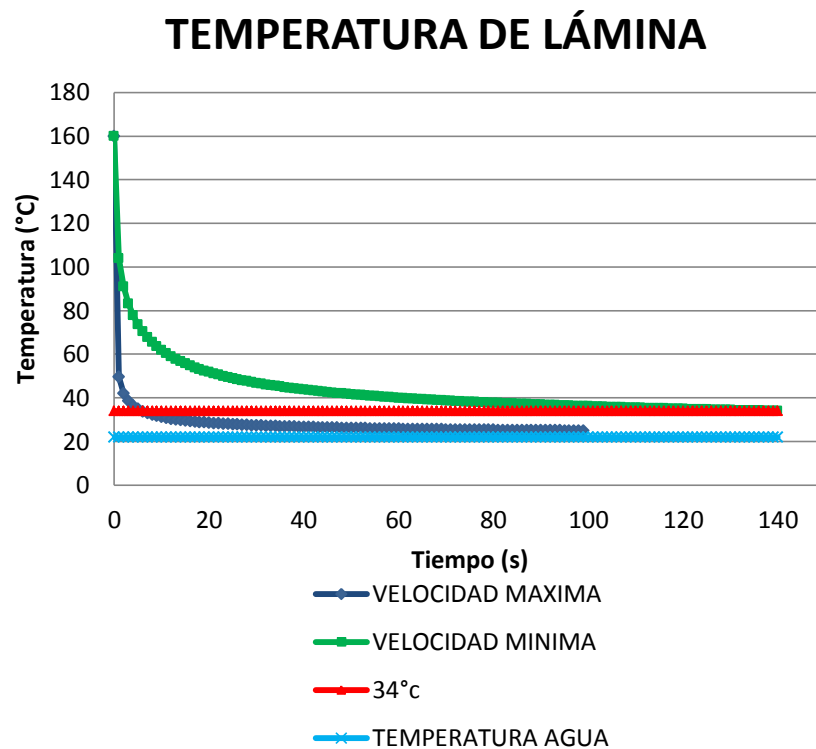


Figura 19 Variación de la temperatura en función del tiempo

De la Figura 19, podemos obtener el tiempo requerido de enfriamiento para cada velocidad de laminación, tomando en cuenta que se busca una temperatura menor a 34°C.

Para:

$$u_{\text{agua1}} = u_{1\text{max}}$$

$$t_{e1} = 6\text{s}$$

$$d_{e1} = t_{e1} \cdot u_{1\text{max}} = 4\text{m}$$

$$u_{\text{agua2}} = u_{1\text{min}}$$

$$t_{e2} = 138\text{s}$$

$$d_{e2} = t_{e2} \cdot u_{1\text{min}} = 15.34\text{m}$$

Se toma el mayor entre d_{e2} y d_{e1} para el diseño de las bandejas siendo esta de 15.341 m. En la Figura 20 se muestra la distribución final de las bandejas, tomando en cuenta la distancia mínima de enfriamiento.

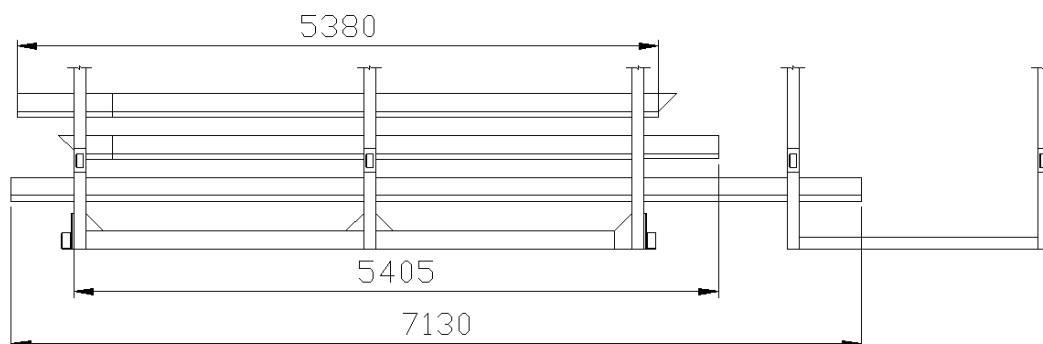


Figura 20 Longitud de bandejas de enfriamiento

La distancia a ser implementada para el enfriamiento es de 17.915 m.

La Figura 21 muestra el recorrido que hace la lámina en esta etapa de enfriamiento para láminas asfálticas sin autoprotección.

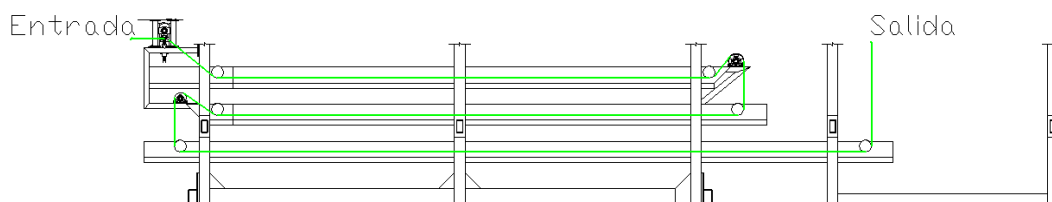


Figura 21 Recorrido de lámina en las bandejas

3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño de la estructura considera la implementación de ambas etapas de enfriamiento, una para cada producto como se indicó previamente. De igual forma se debe tomar en cuenta el uso de los elementos existentes. La modificación de estos elementos tiene por motivo crear el espacio suficiente para las bandejas, así como igualar el nivel de los andenes en toda la línea de laminación, para esto último la cota de 2120 mm, que se indica en la Figura 22, debe ser de 3150 mm.

La Figura 23 muestra el diseño final de la estructura e incluye la estación de tracción. El análisis de dicha estructura se realiza con el programa computacional SAP2000, el cual permite simular el comportamiento de las mismas considerando los diferentes tipos de

elementos estructurales, así como las cargas externas proveniente de rodillos, motores, tolvas de gránulos y cargas vivas del personal de producción.

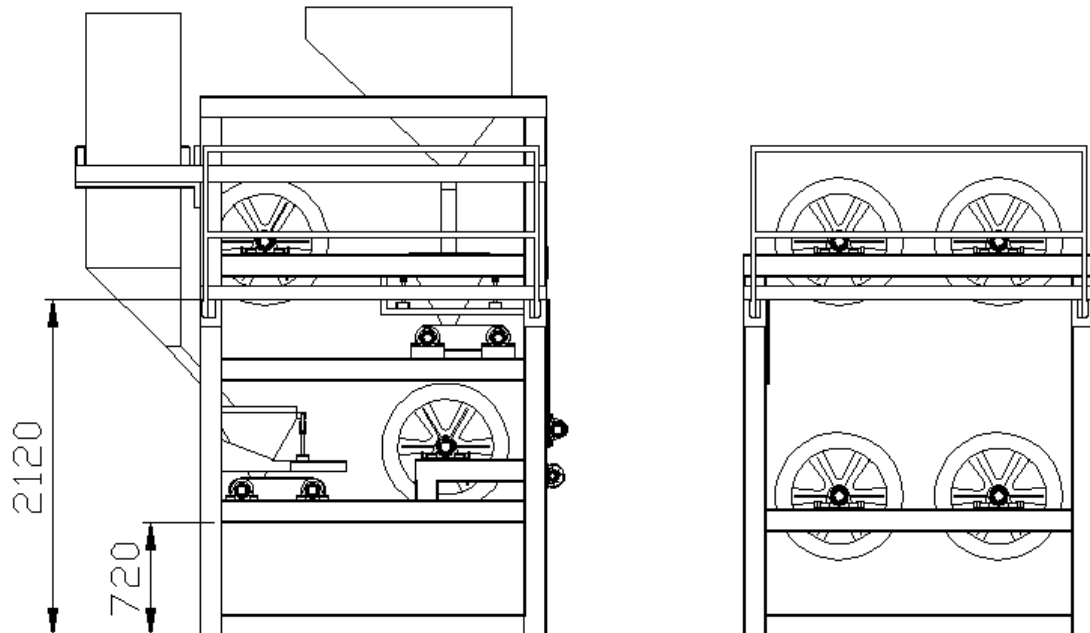


Figura 22 Partes existentes laminadora

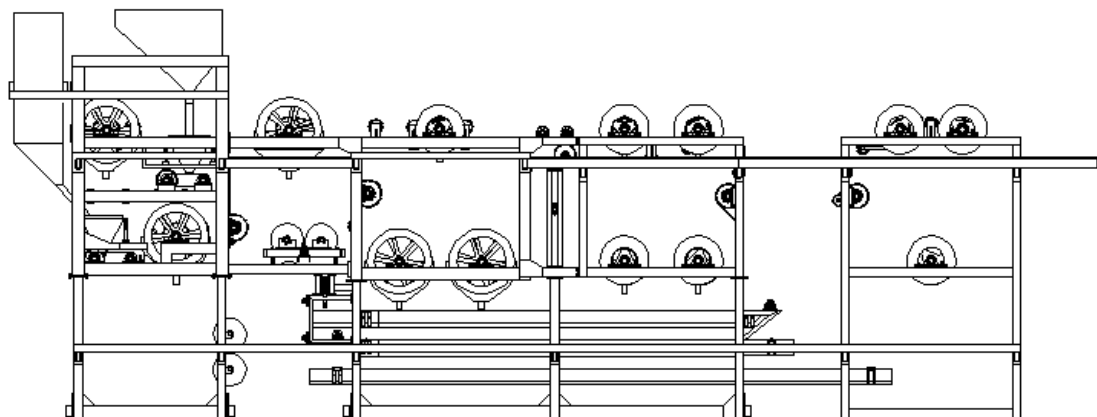


Figura 23 Estructura final

3.3.1 DETERMINACIÓN DE CARGAS

Peso de los rodillos

Se emplean 3 tipos de rodillos con diferentes diámetros y longitudes, por lo tanto se manejan 3 pesos distintos. No obstante, para los rodillos superiores, como se muestra en la Figura 24, se considera también la fuerza

que ejerce la lámina al romperse. Se emplea la máxima resistencia a la tensión de los productos ofertados, esta corresponde al Imperpol400 con un valor de $420 \frac{N}{cm}$.

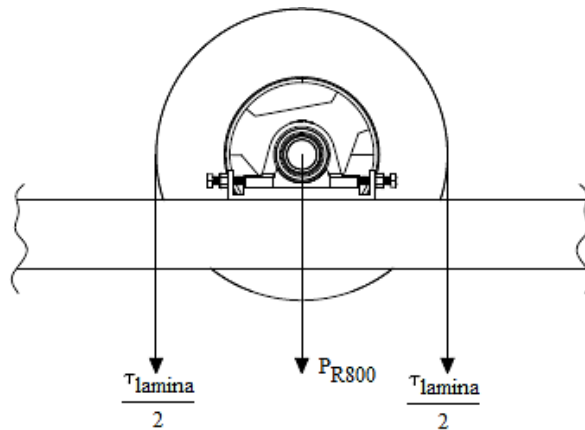


Figura 24 Fuerzas generadas en un rodillo

Rodillo de enfriamiento $\varnothing 800 \text{ mm}$.

$$m_{R800} = 442 \text{ kg}$$

$$P_{R800} = m_{R800}g = 4.335 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\tau_{\text{lamina}} = 840 \text{ N}$$

Este valor para la tensión corresponde al ancho de lámina de 1m. (IMPTEK, 2014)

Con estos datos se determina la carga por apoyo tanto para los rodillos que soportaran la ruptura de la lámina (superiores), como los que solo consideran el peso propio del rodillo.

$$C_{\text{sup}R800} = \frac{P_{R800} + \tau_{\text{lamina}}}{2} = 6.367 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{\text{inf}R800} = \frac{P_{R800}}{2} = 2.167 \times 10^3 \text{ N}$$

Rodillo de enfriamiento $\varnothing 600 \text{ mm}$.

$$m_{R600} = 435.22 \text{ kg}$$

$$P_{R600} = m_{R600}g = 4.268 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{\text{sup}R600} = \frac{P_{R600} + \tau_{\text{lamina}}}{2} = 6.334 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{\text{inf}R600} = \frac{P_{R600}}{2} = 2.134 \times 10^3 \text{ N}$$

Rodillo de paso $\varnothing 150 \text{ mm}$

$$m_{R150} = 34.26 \text{ kg}$$

$$P_{R150} = m_{R150}g = 335.976 \text{ N}$$

$$C_{\text{sup}R150} = \frac{P_{R150} + \tau_{\text{lamina}}}{2} = 4.368 \times 10^3 \text{ N}$$

$$C_{\text{inf}R150} = \frac{P_{R150}}{2} = 167.988 \text{ N}$$

Peso de tolvas

Las dos tolvas tienen una capacidad de 2000 kg de gránulo mineral o arena cada una. La Figura 25 indica la distancia en la que se soporta cada tolva en la estructura.

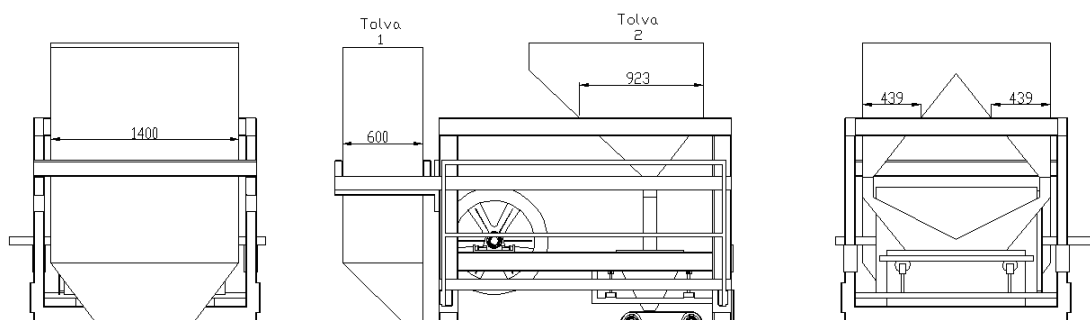


Figura 25 Apoyos de tolvas

$$m_{Tol1} = 164.7\text{kg}$$

$$d_{apoyo1} = 4000\text{mm} = 4\text{m}$$

$$C_{Tol1} = \frac{(m_{Tol1} + 200\text{kg}) \cdot g}{d_{apoyo1}} = 5.307 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$m_{Tol2} = 134.8\text{kg}$$

$$d_{apoyo2} = 2724\text{mm} = 2.724\text{m}$$

$$C_{Tol2} = \frac{(m_{Tol2} + 200\text{kg}) \cdot g}{d_{apoyo2}} = 7.685 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Peso de los motores

La selección de los motores para tracción se analizará en literal 3.3. El peso del conjunto motor y reductor se obtiene de los datos del fabricante, adicionalmente este se ubica sobre una base que se apoya simétricamente en 4 puntos.

$$m_{motor} = 51\text{kg}$$

$$m_{reductor} = 74\text{kg}$$

$$m_{bmotor} = 54\text{kg}$$

$$P_{apmotor} = \frac{(m_{motor} + m_{reductor} + m_{bmotor}) \cdot g}{4} = 438.848\text{N}$$

Peso del agua en bandejas

Cada bandeja tiene una altura de 15 cm. Suponiendo un llenado completo se obtiene:

$$H_{nivagua} = 15\text{cm} = 0.15\text{m}$$

$$P_{agua} = \rho_{agua} \cdot g \cdot H_{nivagua} = 1.527 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Carga viva del personal

Se asume un hombre promedio de 80 kg por cada metro cuadrado de caminera.

$$m_{\text{hombre}} = 80\text{kg}$$

$$P_{\text{hombre}} = \frac{m_{\text{hombre}} \cdot g}{1\text{m}^2} = 784.532\text{Pa}$$

Peso de carro polietileno

El polietileno de alta densidad (HDPE) que cubre las caras de la lámina tanto las no protegidas como las autoprotegidas es suministrado por bobinas de polietileno con un peso de 100 kg cada uno. La Figura 26 muestra un esquema del carro que soporta las bobinas; el peso de todo el conjunto se encuentra distribuido en 4 puntos de apoyo.

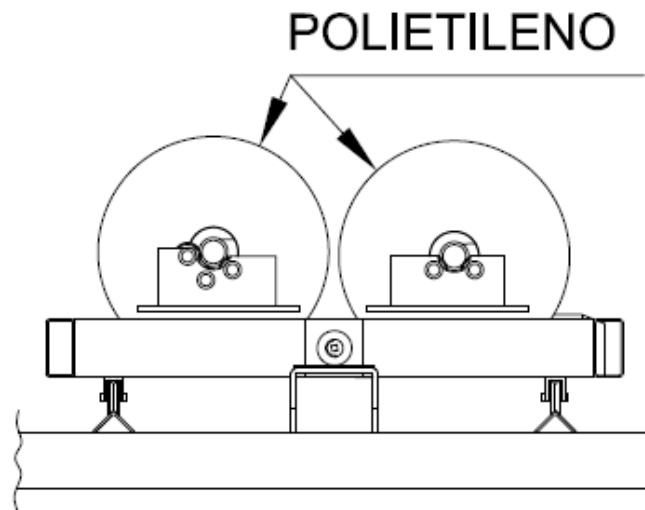


Figura 26 Carro soporte de polietileno

$$m_{\text{HDPE}} = 100\text{kg}$$

$$m_{\text{carro}} = 71.7\text{kg}$$

$$P_{\text{aHDPE}} = \frac{(m_{\text{HDPE}} + m_{\text{carro}}) \cdot g}{4} = 666.117\text{N}$$

3.3.2 SIMULACIÓN

Lo primero es generar un croquis correspondiente a las líneas neutras de cada elemento en la estructura como se muestra en la Figura 27.

Ahora es necesario asignar los elementos estructurales a cada uno de los miembros del croquis y asignar las cargas determinadas anteriormente, para lo cual se debe tomar en cuenta que las cargas generadas por el personal de producción se asignan como cargas vivas y el resto como cargas muertas. En la Figura 28 se muestra la estructura con sus respectivos elementos, cargas y restricciones, de igual forma se han asignado elementos que simulan la base de las bandejas y el grating para el personal.

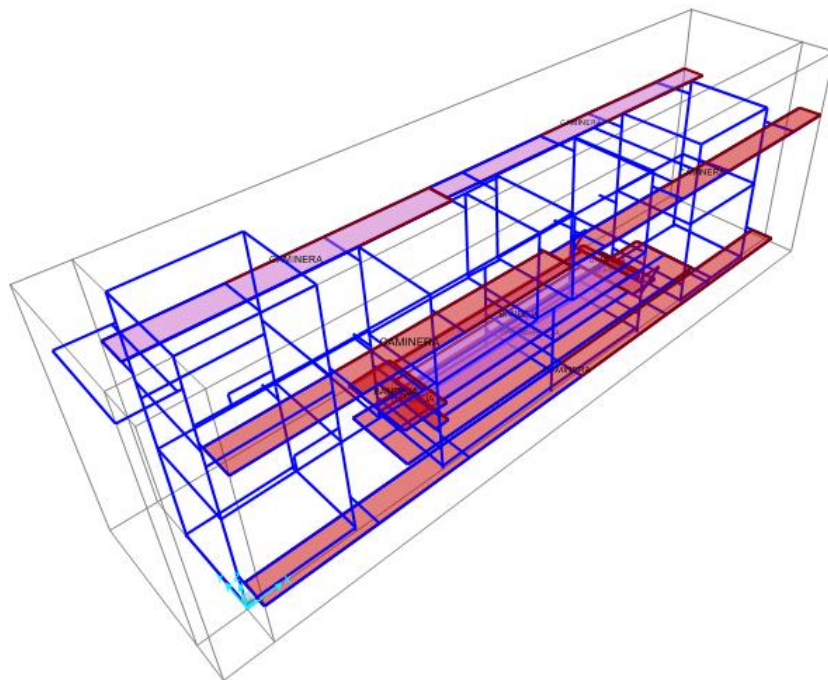


Figura 27 Mallado de la estructura

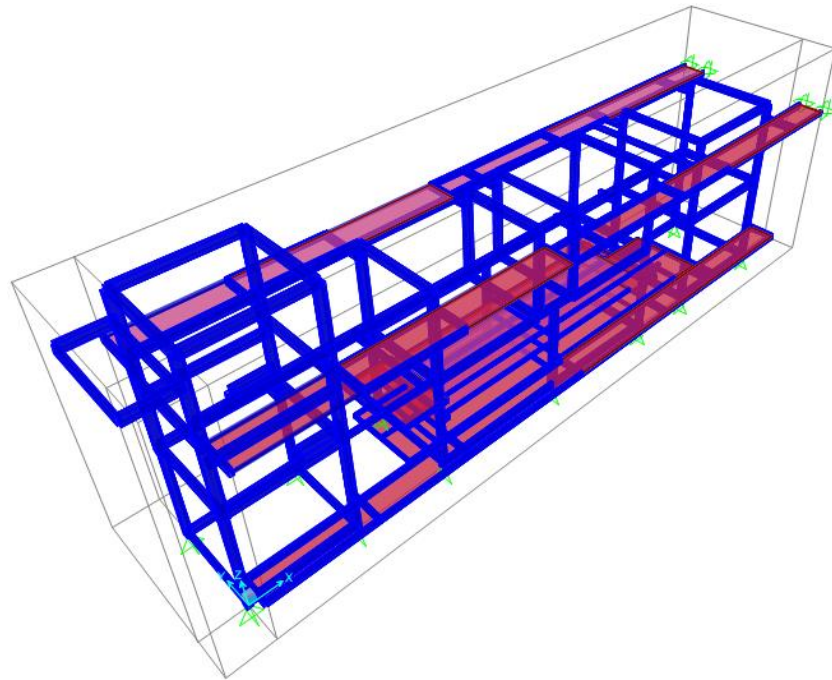


Figura 28 Asignación de elementos, restricciones y cargas

3.3.3 RESULTADOS

La Figuras 29 muestra los diagramas de esfuerzo para los elementos de la estructura y especifica aquellos que serán tomados en cuenta para analizar en base a criterios de aceptación como se muestra en la Tabla 8 y 9. Los elementos seleccionados son los que presentan mayores esfuerzos y deflexiones.

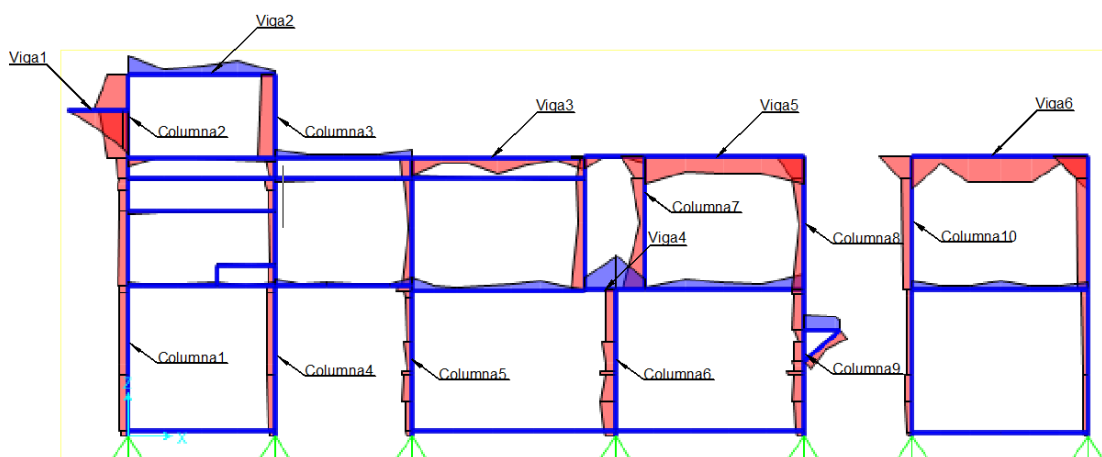


Figura 29 Diagrama de esfuerzo

Los criterios de aceptación requeridos son los siguientes:

Columnas

El esfuerzo crítico de las columnas a analizar se obtiene de acuerdo a las ecuaciones planteadas para una condición de columna empotrada articulada como la que se muestra en la Figura 30.

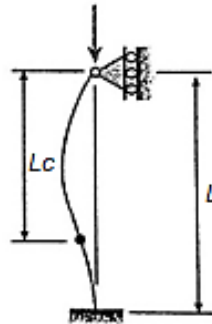


Figura 30 Columna empotrada – articulada

Fuente: (Gere, 2003)

$$\sigma_{cr} = \frac{2.046\pi^2 \cdot E \cdot I}{A_{sec} L_{col}^2}$$

Para la deflexión máxima permisible se analizan criterios conformes a las condiciones de diseño para estructuras metálicas de la AISC.

$$\delta_{crc} = \frac{L_{col}}{500}$$

Vigas

El esfuerzo máximo permisible para una viga se evalúa simplemente con el factor de seguridad en función del esfuerzo de fluencia del material:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{viga}}$$

La deflexión máxima permisible de acuerdo a la AISC es:

$$\delta_{crv} = \frac{L_{viga}}{600}$$

El factor de seguridad mínimo requerido por el cliente, luego de considerar todas las cargas propuestas es de 3. Este valor debe ser evaluado con el menor valor entre el esfuerzo crítico de la columna y el esfuerzo de fluencia del material.

Tabla 8

Análisis de columnas

COLUMNAS										
#	L_{col} [mm]	I [mm ⁴]	A_{sec} [mm ²]	δ_{crc} [mm]	σ_{cr} [MPa]	S_y [MPa]	δ_{col} [mm]	σ_{col} [MPa]	FS	δ [%]
1	1726	2865833	1900	3.45	650.71	250	0.02	14.58	17.14	0.49
2	2622	1867605	1696	5.24	205.86	250	0.37	57.75	3.56	7.00
3	2622	1867605	1696	5.24	205.86	250	0.35	29.11	7.07	6.73
4	1726	2865833	1900	3.45	650.71	250	0.02	14.27	17.52	0.52
5	1666	2865833	1900	3.33	698.43	250	0.03	18.44	13.56	0.90
6	1768	2865833	1900	3.54	620.16	250	0.03	26.74	9.35	0.79
7	1600	2363392	1536	3.20	772.46	250	0.08	41.49	6.03	2.34
8	1600	2363392	1536	3.20	772.46	250	0.09	46.93	5.33	2.78
9	1768	2865833	1900	3.54	620.16	250	0.06	26.93	9.28	1.56
10	3368	2363392	1536	6.74	174.33	250	0.13	53.40	3.26	1.89

Tabla 9

Análisis de vigas

VIGAS							
#	L_{viga} [mm]	δ_{crv} [mm]	S_y [MPa]	δ_{viga} [mm]	σ_{viga} [MPa]	FS	δ [%]
1	720	1.20	250	0.14	73.21	3.41	11.33
2	1756	2.93	250	0.23	29.97	8.34	7.72
3	2060	3.43	250	0.38	29.08	8.60	11.18
4	720	1.20	250	0.26	58.58	4.27	21.83
5	1900	3.17	250	0.86	48.29	5.18	27.06
6	2100	3.50	250	1.50	58.17	4.30	42.94

3.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS

3.4.1 JUNTAS EMPERNADAS

Por requerimiento de Chova del Ecuador, las principales uniones deben ser empernadas. Esto para facilitar el desmontaje en cualquier mejora futura que se planee.

Se seleccionan las uniones empernadas más críticas, las cuales se muestran en la Figura 31. Las cargas soportadas por las mismas se obtienen desde la simulación realizada en SAP2000, adicionalmente las juntas se analizarán bajo condiciones de fatiga.

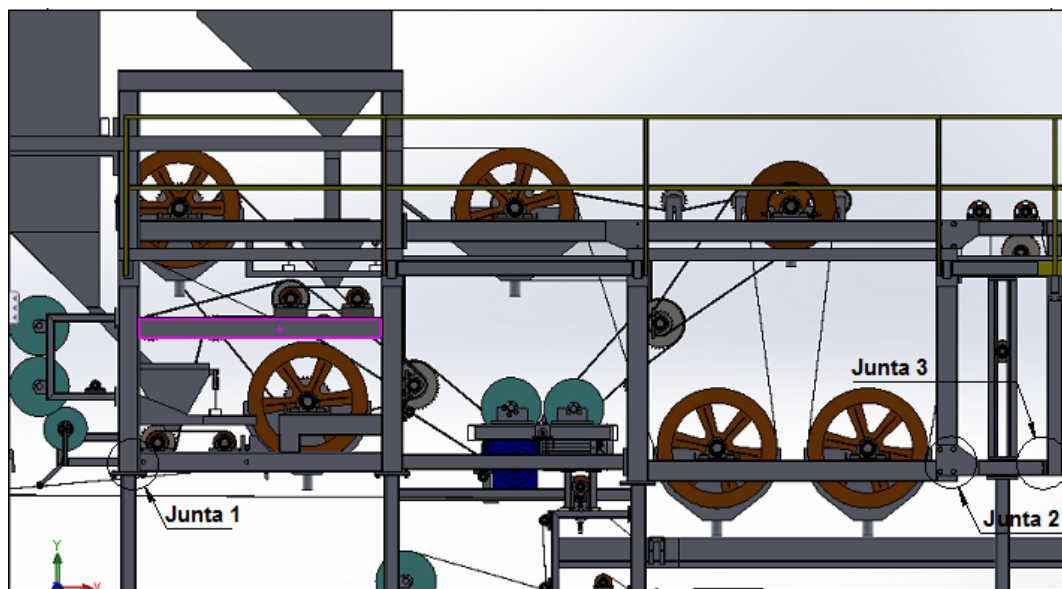


Figura 31 Juntas empernadas

Junta empernada 1

La figura 32 muestra un esquema de la junta 1 en dos dimensiones y resume las cargas aplicadas al centro de la placa pernada. El eje x, para esta y todas las juntas, corresponde al eje axial de los elementos estructurales involucrados en la unión.

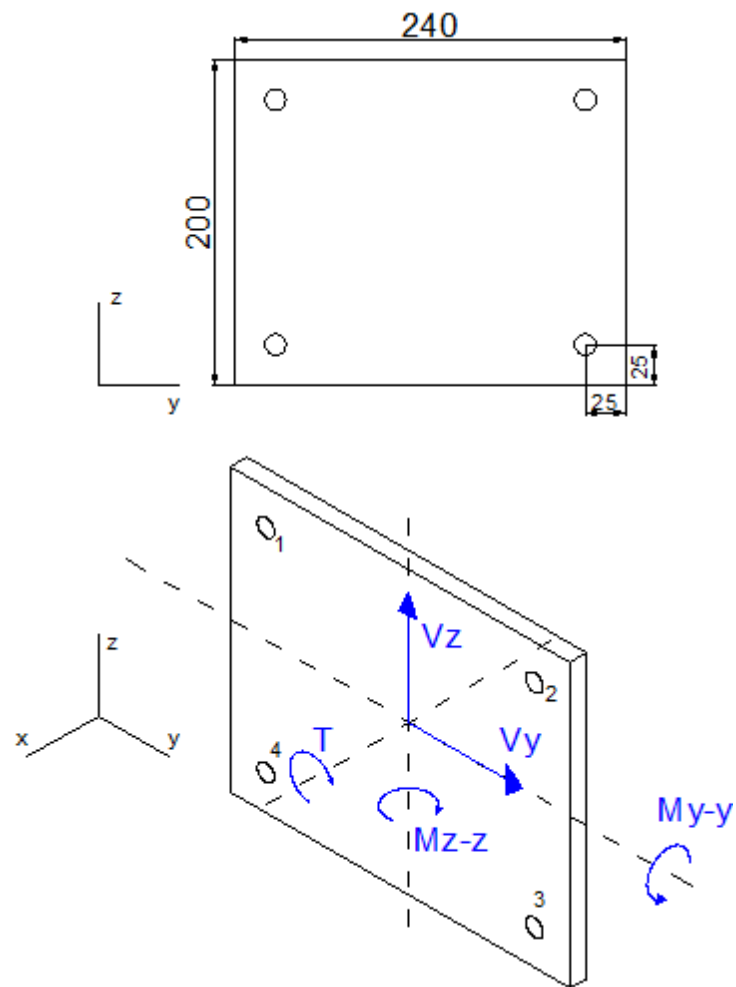


Figura 32 Junta emperrada 1

Los valores asignados en la simulación serán los valores máximos para el análisis de fatiga, mientras que los valores mínimos se consideran de cero, esto representa el caso más crítico.

$$T_{J1} = 2290 \text{ Nmm}$$

$$My_{J1} = 67919.7 \text{ Nmm}$$

$$Mz_{J1} = 75932.6 \text{ Nmm}$$

$$Vy_{J1} = 135.7 \text{ N}$$

$$Vz_{J1} = 46.0 \text{ N}$$

Fuerza cortante en cada perno:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \frac{V_{J1}}{4}$$

$$V_{J1} = \left(V_{yJ1}^2 + V_{zJ1}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 143.288\text{N}$$

$$V_{PJ1} = \frac{V_{J1}}{4} = 35.822\text{N}$$

Fuerza causada por la torsión:

Primero se determina la distancia desde el centro de la placa al centro de cada perno, en este caso esta es igual para cada uno de los pernos.

$$d_{cpJ1} = \left[\left(\frac{240\text{mm}}{2} - 25\text{mm} \right)^2 + \left(\frac{200\text{mm}}{2} - 25\text{mm} \right)^2 \right]^{0.5} = 0.12 \text{ m}$$

$$F_{TJ1} = \frac{d_{cpJ1} \cdot T_{J1}}{4 \cdot d_{cpJ1}^2} = 4.73 \text{ N}$$

La Figura 33 muestra el comportamiento de la interacción de la fuerza cortante y la fuerza generada por la torsión en un perno.

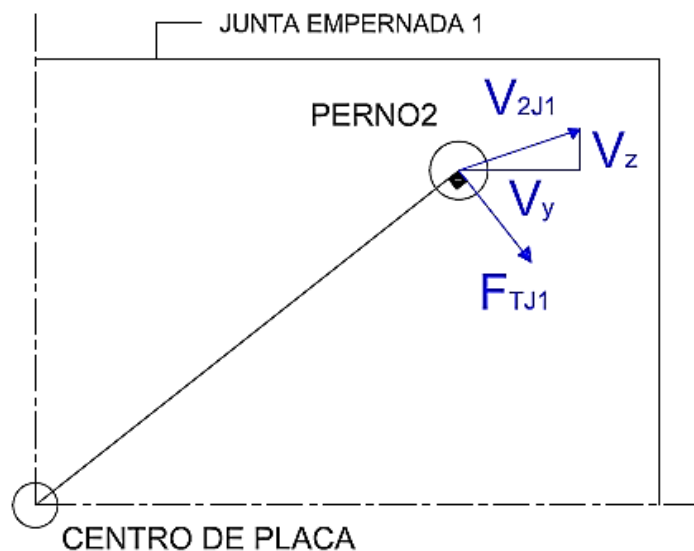


Figura 33 Interacción de fuerzas cortantes en un perno

Se suma ambas fuerzas (F_{TJ1} y V_{2J1}) gráficamente y se obtiene:

$$V_{\text{TotalJ1}} = 144.96\text{N}$$

Los momentos generados en torno a los ejes Y y Z, generan esfuerzos de tensión en los pernos. Debido a la distancia que usan de apoyo, las fuerzas no son iguales para los 4 pernos, como se muestra en las Figura 34 y 35.

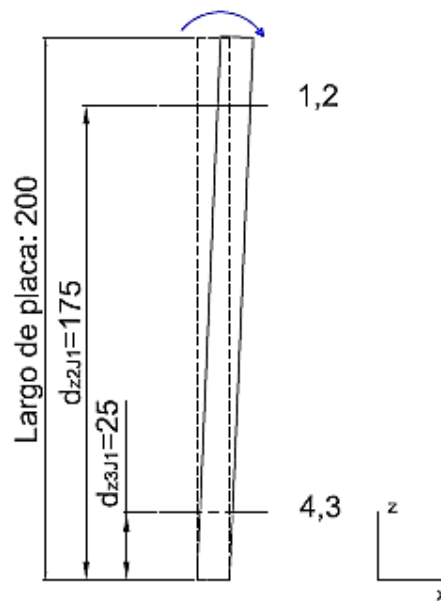


Figura 34 Efecto de M_y -y sobre la junta

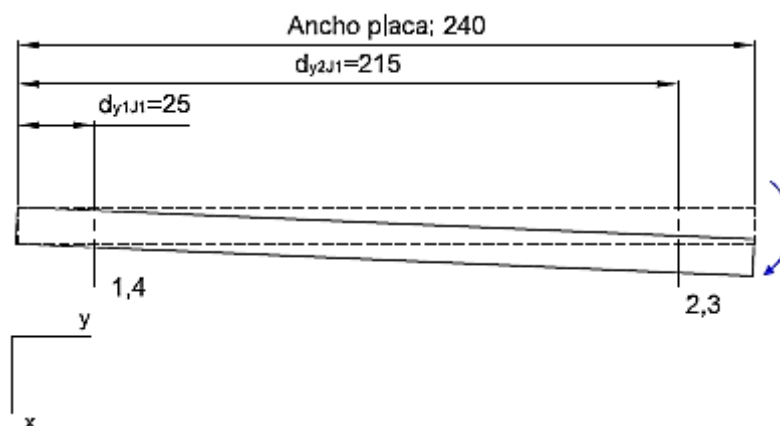


Figura 35 Efecto de M_z -z sobre la junta

El brazo de palanca para el perno 2 es el más grande tanto en la Figura 34 como 35, por lo que este será el perno de análisis.

$$F_{MyJ1} = \frac{d_{z2J1} \cdot MyJ1}{2(d_{z2J1}^2 + d_{z3J1}^2)}$$

$$d_{z2J1} = 175\text{mm}$$

$$d_{z3J1} = 25\text{mm}$$

$$F_{MyJ1} = \frac{d_{z2J1} \cdot MyJ1}{2(d_{z2J1}^2 + d_{z3J1}^2)} = 190.175\text{N}$$

$$F_{MzJ1} = \frac{d_{y2J1} \cdot MzJ1}{2(d_{y2J1}^2 + d_{y1J1}^2)}$$

$$d_{y2J1} = 215\text{mm}$$

$$d_{y1J1} = 25\text{mm}$$

$$F_{MzJ1} = \frac{d_{y2J1} \cdot MzJ1}{2(d_{y2J1}^2 + d_{y1J1}^2)} = 174.232\text{N}$$

Ambas fuerzas son positivas en el eje X, por lo que se suman directamente.

$$F_{MJ1} = F_{MyJ1} + F_{MzJ1} = 364.407\text{N}$$

Con las fuerzas generadas por los momentos y por el torque se determina el esfuerzo cortante y esfuerzo flector máximo y mínimo. Se usan los datos del perno mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10

Propiedades perno 1/2"

Tamaño	Diámetro [mm]	Cuerdas por pulgada	Área de esfuerzo [mm ²]	Grado SAE	Resistencia de prueba mínima [MPa]	Resistencia a la fluencia [MPa]	Resiste a la tensión [MPa]
1/2	12.7	13	91.55	8	827	896	1034

Fuente: (Norton, 2011)

$$A_P = 91.55 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\max J1} = \frac{V_{\text{Total}J1}}{A_P} = 1.583 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\min J1} = 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\max J1} = \frac{F_{MJ1}}{A_P} = 3.98 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\min J1} = 0 \text{ Pa}$$

Se realiza el análisis por fatiga, para lo cual es necesario determinar el límite de resistencia a la fatiga corregido del perno (S_e), dicho límite “es un nivel de esfuerzo por abajo del cual se puede ciclar infinitamente sin falla de por medio.” (Norton, 2011)

$$S_{eP} = 0.5 \cdot S_{uP} \cdot C_{\text{carga}P} \cdot C_{\text{tamaño}P} \cdot C_{\text{sup}P} \cdot C_{\text{temp}P} \cdot C_{\text{conf}P}$$

Cada uno de los factores se determina tomando en cuenta los criterios dictados en el libro de Diseño de Máquinas de Norton.

$$C_{\text{carga}P} = 1$$

$$C_{\text{tamaño}P} = 1.18912.7^{-0.097} = 0.929$$

$$C_{\text{sup}P} = 4.51 \cdot (1034)^{-0.265} = 0.717$$

$$C_{\text{temp}P} = 1$$

$$C_{\text{conf}P} = 0.62$$

$$S_{uP} = 1034 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$S_{eP} = 0.5 S_{uP} \cdot C_{\text{carga}P} \cdot C_{\text{tamaño}P} \cdot C_{\text{sup}P} \cdot C_{\text{temp}P} \cdot C_{\text{conf}P} = 2.135 \times 10^8 \text{ Pa}$$

En la Figura 36 se muestra como varia la carga en un análisis de fatiga.

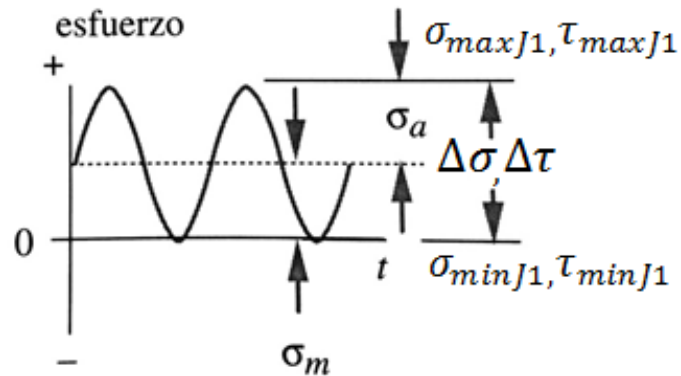


Figura 36 Análisis de fatiga
Basado en: (Norton, 2011)

$$\sigma_{an} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_{mn} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\tau_{an} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2}, \quad \tau_{mn} = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}$$

$$\sigma_{anJ1} = \frac{\sigma_{maxJ1} - \sigma_{minJ1}}{2} = 1.99 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{mnJ1} = \frac{\sigma_{maxJ1} + \sigma_{minJ1}}{2} = 1.99 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{mnJ1} = \frac{\tau_{maxJ1} + \tau_{minJ1}}{2} = 7.917 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\tau_{anJ1} = \frac{\tau_{maxJ1} - \tau_{minJ1}}{2} = 7.917 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Todos los valores calculados arriba representan los valores nominales, dichos valores deben ser multiplicados por factores de concentración de esfuerzos geométricos para fatiga ($K_f, K_{fm}, K_{fs}, K_{fsm}$).

$$\sigma_a = K_f \cdot \sigma_{an}$$

$$\sigma_m = K_{fm} \cdot \sigma_{mn}$$

$$\tau_a = K_{fs} \cdot \tau_{an}$$

$$\tau_m = K_{fsm} \cdot \tau_{mn}$$

$$K_f = 5.7 + 0.02682d_p$$

$$K_f = 5.7 + 0.0268212.7 = 6.041$$

$$K_f \cdot \sigma_{\max J1} = 2.404 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$S_{yP} = 898 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Como:

$$K_f \cdot \sigma_{\max J1} < S_{yP}$$

$$K_{fm} = K_f$$

$$K_{fs} = 2.6$$

$$K_{fsm} = K_{fs}$$

$$\sigma_{aJ1} = K_f \cdot \sigma_{anJ1} = 1.202 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{mJ1} = K_{fm} \cdot \sigma_{mnJ1} = 1.202 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{aJ1} = K_{fs} \cdot \tau_{anJ1} = 2.058 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{mJ1} = K_{fsm} \cdot \tau_{mnJ1} = 2.058 \times 10^6 \text{ Pa}$$

El esfuerzo equivalente por la interacción de tensión y corte se determina:

$$\sigma_{eqaJ1} = \left(\sigma_{aJ1}^2 + 4 \cdot \tau_{aJ1}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 1.271 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eqmJ1} = \left(\sigma_{mJ1}^2 + 4 \cdot \tau_{mJ1}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 1.271 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Los pernos seleccionados son estándar en la empresa, por lo que se procede a calcular el factor de seguridad para determinar si soportan o no las cargas, esto se lo realiza por medio del criterio de Goodman modificado.

$$FS_{J1} = \frac{S_{yP}}{\sigma_{eqmJ1} + \frac{S_{yP}}{S_{eP}} \cdot \sigma_{eqaJ1}} = 13.57$$

Junta empernada 2

Se realiza un análisis similar a la junta número uno, pero se consideran nuevas cargas, como se muestra en la Figura 37.

$$M_{xJ2} = 87466\text{Nmm}$$

$$V_{xJ2} = 350\text{N}$$

$$V_{yJ2} = 1152\text{N}$$

$$T_{J2} = 109006\text{Nmm}$$

$$P_{zJ2} = 82\text{N}$$

$$M_{yJ2} = 2830\text{Nmm}$$

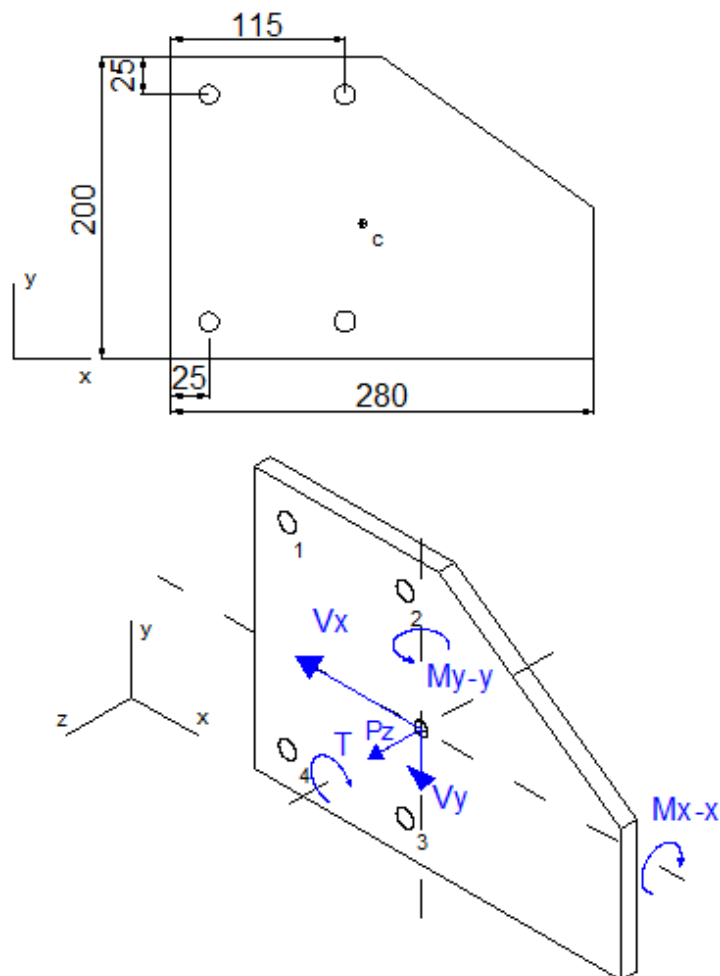


Figura 37 Junta empernada 2

$$V_{J2} = \left(V_{xJ2}^2 + V_{yJ2}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 1.153 \times 10^4 \text{ N}$$

$$V_{PJ2} = \frac{V_{J2}}{4} = 2.883 \times 10^3 \text{ N}$$

$$d_{P1J2} = 133 \text{ mm}$$

$$d_{P2J2} = 86 \text{ mm}$$

$$d_{P3J2} = 66 \text{ mm}$$

$$d_{P4J2} = 121 \text{ mm}$$

$$F_{TJ2} = \frac{d_{P4J2} T_{J2}}{\left(d_{P1J2}^2 + d_{P2J2}^2 + d_{P3J2}^2 + d_{P4J2}^2 \right)} = 2.992 \times 10^3 \text{ N}$$

$$V_{\text{Total}J2} = 1728 \text{ N}$$

El perno 4 es el más crítico.

$$d_{y4J2} = 175 \text{ mm}$$

$$d_{y1J2} = 25 \text{ mm}$$

$$F_{MxJ2} = \frac{d_{y4J2} M_{xJ2}}{2 \left(d_{y4J2}^2 + d_{y1J2}^2 \right)} = 244.905 \text{ N}$$

$$d_{x4J2} = 255 \text{ mm}$$

$$d_{x3J2} = 165 \text{ mm}$$

$$F_{MyJ2} = \frac{d_{x4J2} M_{xJ2}}{2 \left(d_{x4J2}^2 + d_{x3J2}^2 \right)} = 120.888 \text{ N}$$

Ambas fuerzas están en la dirección positiva de Z al igual que Pz.

$$F_{MJ2} = P_{zJ2} + F_{MxJ2} + F_{MyJ2} = 447.793 \text{ N}$$

$$\tau_{\text{max}J2} = \frac{V_{\text{Total}J2}}{A_P} = 1.887 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\min J2} = 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\max J2} = \frac{F_{MJ2}}{A_p} = 4.891 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\min J2} = 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{an}J2} = \frac{\sigma_{\max J2} - \sigma_{\min J2}}{2} = 2.446 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{mn}J2} = \frac{\sigma_{\max J2} + \sigma_{\min J2}}{2} = 2.446 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{mn}J2} = \frac{\tau_{\max J2} + \tau_{\min J2}}{2} = 9.437 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{an}J2} = \frac{\tau_{\max J2} - \tau_{\min J2}}{2} = 9.437 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{a}J2} = K_f \cdot \sigma_{\text{an}J2} = 1.477 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{m}J2} = K_{\text{fm}} \cdot \sigma_{\text{mn}J2} = 1.477 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{a}J2} = K_{\text{fs}} \cdot \tau_{\text{an}J2} = 2.454 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{m}J2} = K_{\text{fsm}} \cdot \tau_{\text{mn}J2} = 2.454 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{eqa}J2} = \left(\sigma_{\text{a}J2}^2 + 4 \cdot \tau_{\text{a}J2}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 5.125 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{eqm}J2} = \left(\sigma_{\text{m}J2}^2 + 4 \cdot \tau_{\text{m}J2}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 5.125 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$FS_{J2} = \frac{S_{yp}}{\sigma_{\text{eqm}J2} + \frac{S_{yp}}{S_{ep}} \cdot \sigma_{\text{eqa}J2}} = 3.36$$

Junta empernada 3

$$T_{J3} = 125135 \text{ Nmm}$$

$$P_{xJ3} = 124 \text{ N}$$

$$M_{zJ3} = 1012645 \text{ Nmm}$$

$$V_{yJ3} = 12425 \text{ N}$$

$$V_{zJ3} = 125 \text{ N}$$

$$M_{yJ3} = 34660 \text{ Nmm}$$

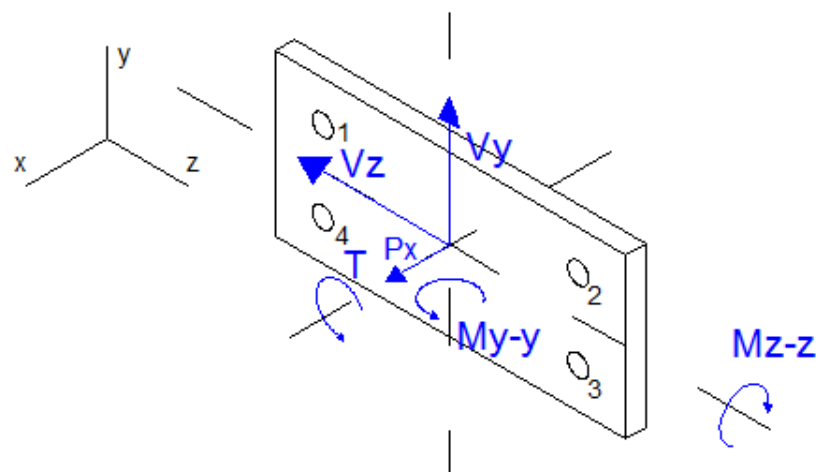
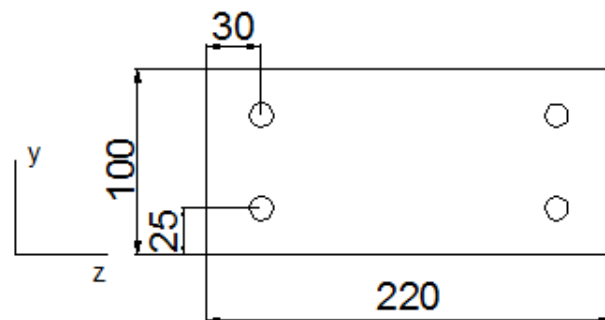


Figura 38 Junta empernada 3

$$V_{J3} = \left(V_{yJ3}^2 + V_{zJ3}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 1.243 \times 10^4 \text{ N}$$

$$V_{PJ3} = \frac{V_{J3}}{4} = 3.106 \times 10^3 \text{ N}$$

$$d_{cpJ3} = \left[\left(\frac{220\text{mm}}{2} - 30\text{mm} \right)^2 + \left(\frac{100\text{mm}}{2} - 25\text{mm} \right)^2 \right]^{0.5} = 0.084\text{m}$$

$$F_{TJ3} = \frac{d_{cpJ3} \cdot T_{J3}}{4 \cdot d_{cpJ3}^2} = 373.246\text{N}$$

$$V_{TotalJ3} = 275 \text{ IN}$$

$$d_{z4J3} = 190\text{mm}$$

$$d_{z3J3} = 30\text{mm}$$

$$F_{MyJ3} = \frac{d_{z4J3} \cdot M_{yJ3}}{2 \left(d_{z4J3}^2 + d_{z3J3}^2 \right)} = 88.992\text{N}$$

$$d_{y4J3} = 75\text{mm}$$

$$d_{y1J3} = 25\text{mm}$$

$$F_{MzJ3} = \frac{d_{y4J3} \cdot M_{zJ3}}{2 \left(d_{y4J3}^2 + d_{y1J3}^2 \right)} = 6.076 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{MJ3} = P_{xJ3} + F_{MyJ3} + F_{MzJ3} = 6.289 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\tau_{\max J3} = \frac{V_{TotalJ3}}{A_P} = 3.005 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\min J3} = 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\max J3} = \frac{F_{MJ3}}{A_P} = 6.869 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\min J3} = 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{anJ3} = \frac{\sigma_{maxJ3} - \sigma_{minJ3}}{2} = 3.435 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{mnJ3} = \frac{\sigma_{maxJ3} + \sigma_{minJ3}}{2} = 3.435 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{mnJ3} = \frac{\tau_{maxJ3} + \tau_{minJ3}}{2} = 1.502 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{anJ3} = \frac{\tau_{maxJ3} - \tau_{minJ3}}{2} = 1.502 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{aJ3} = K_f \cdot \sigma_{anJ3} = 2.075 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{mJ3} = K_{fm} \cdot \sigma_{mnJ3} = 2.075 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\tau_{aJ3} = K_{fs} \cdot \tau_{anJ3} = 3.906 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{mJ3} = K_{fsm} \cdot \tau_{mnJ3} = 3.906 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eqaJ3} = \left(\sigma_{aJ3}^2 + 4 \cdot \tau_{aJ3}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 2.217 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eqmJ3} = \left(\sigma_{mJ3}^2 + 4 \cdot \tau_{mJ3}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 2.217 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$FS_{J3} = \frac{S_{yp}}{\sigma_{eqmJ3} + \frac{S_{yp}}{S_{ep}} \cdot \sigma_{eqaJ3}} = 1.778$$

3.4.2 SISTEMA DE TRACCIÓN

En la Figura 39 se muestran los elementos que darán tracción a la lámina. Se debe dimensionar los piñones faltantes y seleccionar los motores para obtener la velocidad de laminación de $40m/min$.

3.4.2.1 MOTORREDUCTOR

El primer paso es seleccionar los motores con sus respectivas cajas reductoras. Para determinar la potencia requerida por cada motor se emplea teoría de bandas transportadoras. (Forbo Movement Systems)

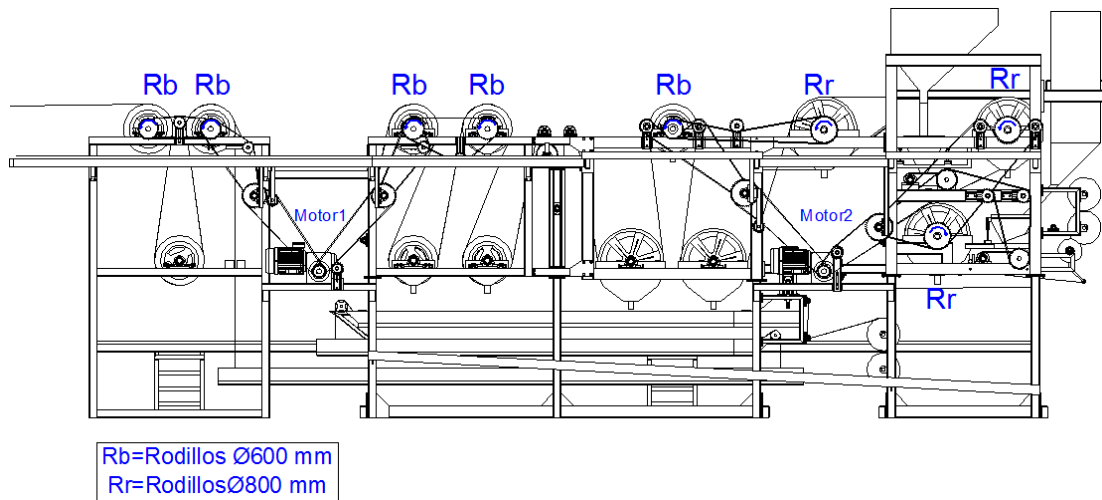


Figura 39 Rodillos de tracción

El Motor 1 sirve para la tracción de láminas con y sin autoprotección, de estas la más pesada corresponde a la denominada 4K con un peso de $5.06 \frac{kg}{m}$. (IMPTEK, 2014)

Se calcula la fuerza tangencial requerida por el motor.

$$F_{tM1} = 0.5g \cdot \left(\frac{m_{4k}}{2} \right) + 0.33g \left(m_{R1} + \frac{m_{4k}}{2} \right)$$

Asumiendo una longitud de 100 m para la láminas.

$$m_{4k} = 100m \cdot 5.06 \frac{kg}{m} = 506 \text{ kg}$$

$$m_{R1} = m_{R150}^{30} + 3 \cdot m_{R600} = 2.333 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$F_{tM1} = 0.33g \cdot \left(\frac{m_{4k}}{2} \right) + 0.033g \cdot \left(m_{R1} + \frac{m_{4k}}{2} \right) = 1.656 \times 10^3 \text{ N}$$

Este valor debe ser multiplicado por un factor promedio de 3.2, debido a que la lámina sale mojada de las etapas de enfriamiento. (Forbo Movement Systems)

$$f_0 = 3.2$$

$$F_{M1} = f_0 \cdot F_{tM1} = 5.299 \times 10^3 \text{ N}$$

La potencia del motor asumiendo una eficiencia del 80% es:

$$\eta = 0.8$$

$$P_{M1} = \frac{F_{M1} \cdot u_{lmax}}{\eta} = 4.415 \times 10^3 \text{ W} \quad (5.92 \text{ hp})$$

El Motor 2 se emplea para la tracción de láminas autoprotegidas, de las cuales la más pesada corresponde al Imperpol 3000 con un peso de $4.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$. (IMPTEK, 2014)

$$m_{I3000} = 100 \text{ m} \cdot 4.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 433 \text{ kg}$$

$$m_{R2} = m_{R15022} + 2 \cdot m_{R800} = 1.638 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$F_{tM2} = 0.33 \text{ g} \cdot \left(\frac{m_{I3000}}{2} \right) + 0.033 \text{ g} \cdot \left(m_{R1} + \frac{m_{I3000}}{2} \right) = 1.526 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{M2} = f_0 \cdot F_{tM2} = 4.883 \times 10^3 \text{ N}$$

$$P_{M2} = \frac{F_{M2} \cdot u_{lmax}}{\eta} = 4.069 \times 10^3 \text{ W} \quad (5.45 \text{ hp})$$

Se requieren 2 motores con una potencia a la salida del reductor de 6 hp. De los motores ofrecidos por el proveedor se selecciona aquel con menor velocidad a la salida del motoreductor, esto debido a que la velocidad de laminación es baja comparada con otros procesos.

La tabla 11 muestra los datos del conjunto motor – reductor.

Tabla 11

Motorreductor

Potencia entrada [Hp]	Potencia salida [Hp]	Velocidad del motor [rpm]	Relación de transmisión reductor
7.5	6.42	1740	25

Fuente: (Rossi, 2011), (ABB, 2005)

3.4.2.2 SELECCIÓN DE PIÑONES

Primero se determina las revoluciones por minuto de los rodillos de tracción.

$$\text{Rev}_{R600} = \frac{u_{\text{Imax}}}{600\text{mm}\pi} = 0.354 \frac{1}{\text{s}} \quad (21.22\text{rpm})$$

$$\text{Rev}_{R800} = \frac{u_{\text{Imax}}}{800\text{mm}\pi} = 0.265 \frac{1}{\text{s}} \quad (15.91\text{rpm})$$

De acuerdo a la Figura 39, ambos motores tienen 2 piñones cada uno. Se toma en cuenta los piñones existentes. En la Figura 40 se muestra el esquema de conexión entre todos los piñones.

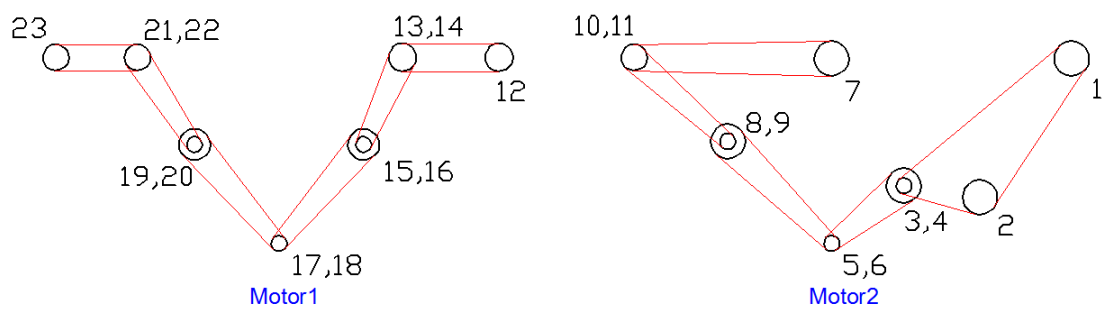


Figura 40 Esquema de conexión entre piñones

Si por ejemplo se desea conocer los piñones 5 y 6 del motor se parte de obteniendo la relación de transmisión en función de la velocidad de salida del motor y la velocidad requerida en el piñón 1.

$$i_{1a5} = \frac{69.6}{15.91} = 4.37$$

Los piñones 1, 2, 3, 4, 7, 8 y 9 son parte de la laminadora original Dr. Reiser.

$$Z_1 = 40$$

$$Z_2 = 40$$

$$Z_3 = 20$$

$$Z_4 = 40$$

Se determinan relaciones de transmisión entre cada conexión para determinar los piñones faltantes.

$$i_{5a4} = \frac{i_{1a5}}{\frac{Z_1}{Z_3}} = 2.18$$

$$Z_5 = \frac{Z_4}{i_{5a4}} = 18.28$$

$$i_{7a11} = \frac{21.22}{15.91} = 1.33$$

$$Z_7 = 40$$

$$Z_{11} = \frac{Z_7}{i_{7a11}} = 29.99$$

Si asumimos:

$$Z_6 = 18$$

$$Z_8 = 40$$

$$i_{6a8} = \frac{Z_8}{Z_6} = 2.22$$

$$i_{10a6} = \frac{69.6}{21.22} = 3.2$$

$$i_{9a10} = \frac{i_{10a6}}{i_{6a8}} = 1.47$$

$$Z_9 = 20$$

$$Z_{10} = Z_9 \cdot i_{9a10} = 29.51$$

Así se determinan los piñones faltantes para la etapa que involucra al Motor 2.

La Tabla 12 muestra el número de dientes de todos los piñones involucrados con la tracción de la lámina, así como el sentido de giro requerido.

Tabla 12

Piñones de tracción

Piñon	Número dientes	Sentido giro	Piñon	Número dientes	Sentido giro
1	40	AH	13	30	AH
2	40	H	14	30	AH
3	20	H	15	18	AH
4	40	H	16	36	AH
5	18	H	17	18	AH
6	18	H	18	18	AH
7	40	AH	19	18	AH
8	20	H	20	36	AH
9	40	H	21	30	AH
10	30	AH	22	30	AH
11	30	AH	23	30	AH
12	30	AH			

3.4.2.3 FLECHAS

Se deben diseñar las dos flechas que se indican en la Figura 41. Ambas están cargadas simétricamente por lo que se realiza los cálculos para solo una de ellas.

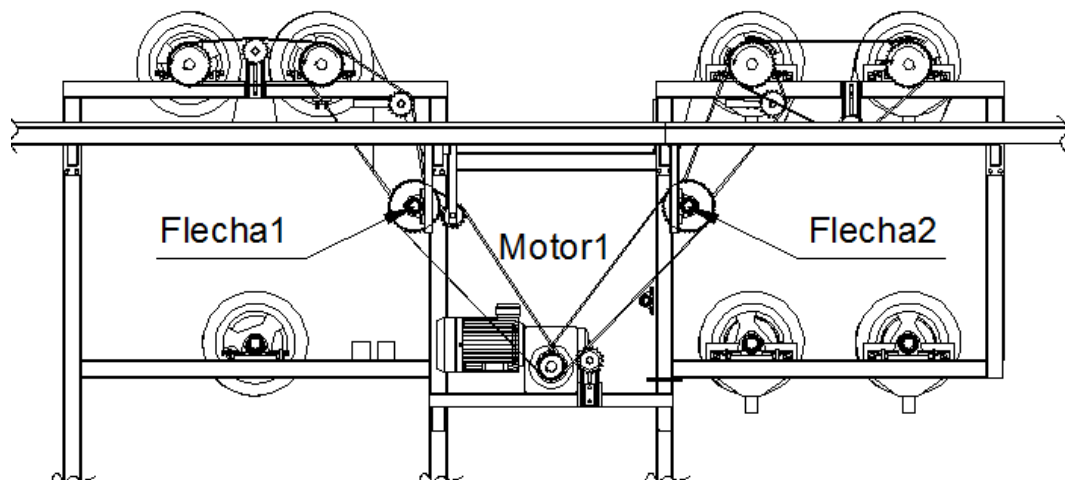


Figura 41 Flechas

En la Figura 42 se muestran los elementos que influyen en la Flecha1.

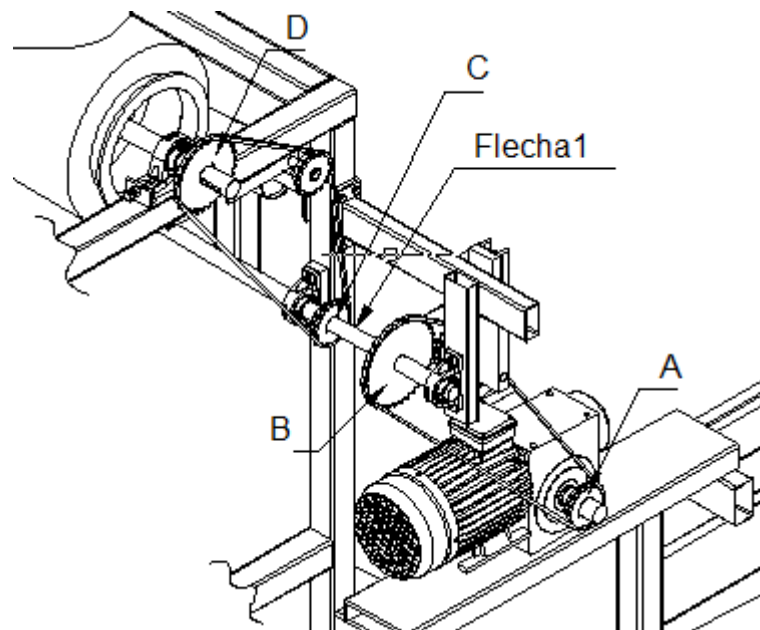


Figura 42 Flecha1

Las cargas de la flecha de se determinan en función de los piñones, potencia y sentido de giro. Las Figuras 43 y 44 muestran los esquemas para el cálculo de dichas cargas.

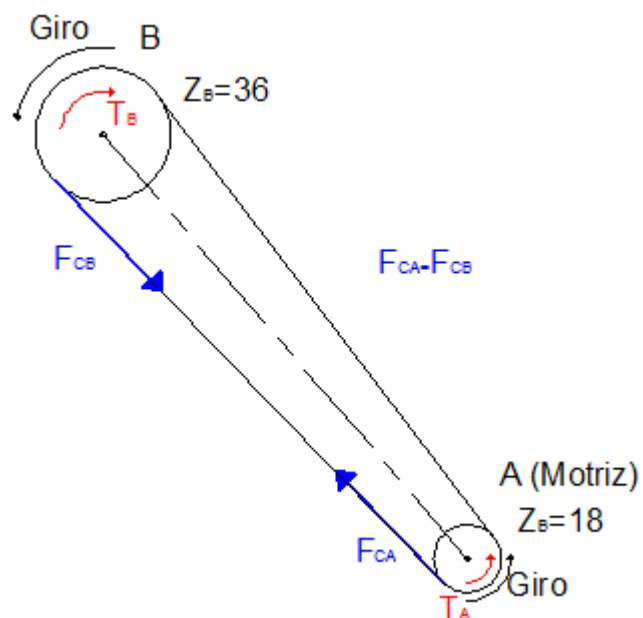


Figura 43 Piñones A-B

$$F_c = \frac{T}{r}, \quad T = \frac{P_M}{\omega} = \frac{P_M}{2 \cdot \omega}$$

$$P_M = 6.42 \text{ hp} = 4.787 \times 10^3 \text{ W}$$

$$\omega_A = 69.6 \frac{2\pi}{60\text{s}} = 7.288 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_A = \frac{P_M}{2 \cdot \omega_A} = 328.42 \text{ Nm}$$

$$r_A = \frac{146.27 \text{ mm}}{2} = 0.073 \text{ m}$$

$$F_{cA} = \frac{T_A}{r_A} = 4.491 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{cB} = F_{cA}$$

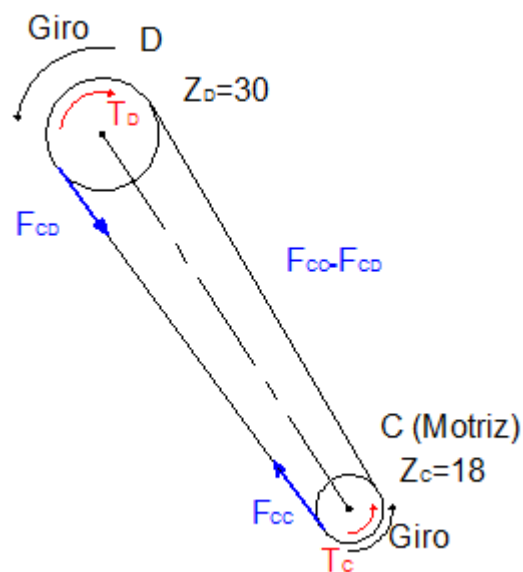


Figura 44 Piñones C-D

$$\omega_C = 69.6 \frac{18}{36} \cdot \frac{2\pi}{60\text{s}} = 3.644 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_C = \frac{P_M}{2 \cdot \omega_C} = 656.842 \text{ Nm}$$

$$r_C = \frac{146.27\text{mm}}{2} = 0.073r$$

$$F_{cC} = \frac{T_C}{r_C} = 8.981 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{cD} = F_{cC}$$

$$T_B = T_C$$

Se descomponen las fuerzas para cada F_c determinada, como se muestra en la Figura 45.

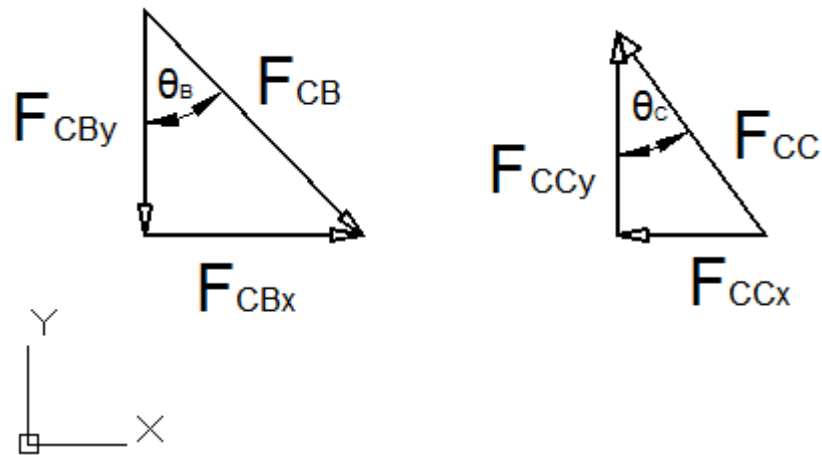


Figura 45 Componentes de fuerzas en B y C

$$\theta_B = 44^\circ = 0.768\text{rad}$$

$$\theta_C = 36.13^\circ = 0.63 \text{ rad}$$

$$F_{cBx} = \sin(\theta_B) \cdot F_{cB} = 3.119 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{cBy} = \cos(\theta_B) \cdot F_{cB} = 3.23 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{cCx} = \sin(\theta_C) \cdot F_{cC} = 5.296 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{cCy} = \cos(\theta_C) \cdot F_{cC} = 7.254 \times 10^3 \text{ N}$$

En la Figura 46 se observa la interacción de estas fuerzas, el peso de los piñones y el torque para la Flecha1. La disposición de los apoyos para la flecha se basa en las flechas existentes.

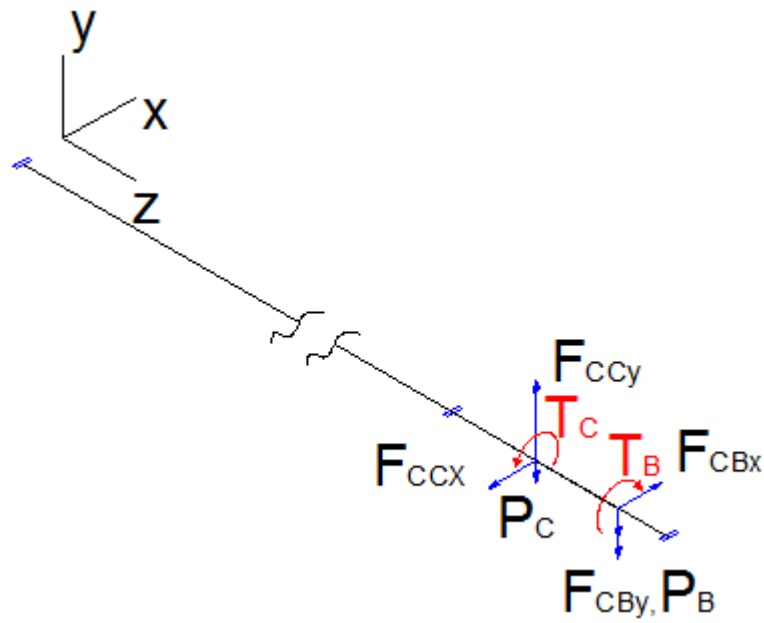


Figura 46 Interacción de fuerzas en Flecha1

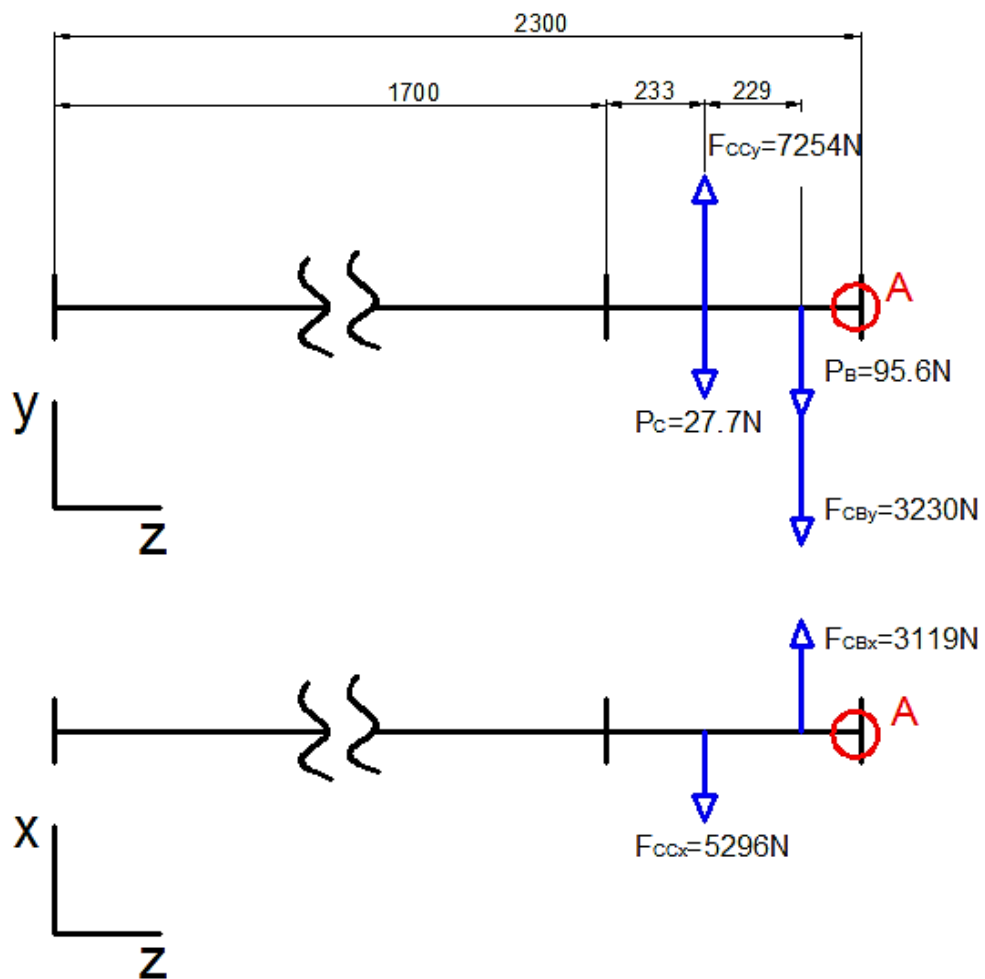


Figura 47 Fuerzas en Plano YZ y XZ

El apoyo A señalado con un círculo rojo de la Figura 47, no es tomado en cuenta para el análisis. El mismo se encuentra apoyado en una viga en voladizo de los andenes para el personal, por lo que se asume en él una carga extra que se determina de la simulación estructural antes realizada. Esta fuerza tiene una magnitud de 461 N, en la dirección negativa del eje Y. (Ver Figura 42)

A continuación se presentan los diagramas de momento para la flecha tanto en el plano YZ (Figura 48) como XZ (Figura 49).



Figura 48 Diagrama de momentos flectores plano y-z

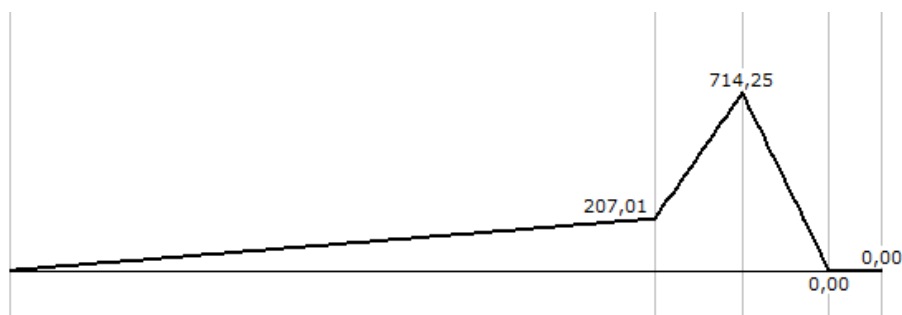


Figura 49 Diagrama de momentos flectores plano x-z

Se obtiene los momentos máximos generados y se calcula su resultante.

$$M_{\max F} = \left[(930.75 \text{ Nm})^2 + (714.25 \text{ Nm})^2 \right]^{0.5} = 1.17310^3 \text{ Nm}$$

$$M_{\min F} = 0 \text{ Nm}$$

$$T_{\max F} = T_B = 656.842 \text{ Nm}$$

$$T_{\min F} = 0 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{an}F} = \frac{M_{\max F} - M_{\min F}}{2} = 586.61 \text{ Nm}$$

$$M_{mnF} = \frac{M_{\max F} + M_{\min F}}{2} = 586.61 \text{ Nm}$$

$$T_{anF} = \frac{T_{\max F} - T_{\min F}}{2} = 328.42 \text{ Nm}$$

$$T_{mnF} = \frac{T_{\max F} + T_{\min F}}{2} = 328.42 \text{ Nm}$$

Se emplea un acero de transmisión SAE1018, dado la ductilidad del acero se considera que no hay sensibilidad a la muesca, por lo que los factores de concentración de esfuerzo para fatiga son igual a uno. (Budynas & Nisbett, 2008)

$$M_{aF} = M_{anF} = 586.61 \text{ Nm}$$

$$M_{mF} = M_{mnF} = 586.61 \text{ Nm}$$

$$T_{aF} = T_{anF} = 328.42 \text{ Nm}$$

$$T_{mF} = T_{mnF} = 328.42 \text{ Nm}$$

Se determina el límite de resistencia a la fatiga corregido del Acero SAE1018 (S_e), considerando un eje de 50 mm de diámetro.

$$S_{eF} = 0.5 \cdot S_{uF} \cdot C_{\text{cargaF}} \cdot C_{\text{tamanoF}} \cdot C_{\text{supF}} \cdot C_{\text{tempF}} \cdot C_{\text{confF}}$$

$$S_{uF} = 500 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$S_{yF} = 300 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$C_{\text{cargaF}} = 1$$

$$C_{\text{tamanoF}} = 1.18950^{-0.097} = 0.8$$

$$C_{\text{supF}} = 4.51 \cdot (500)^{-0.265} = 0.86$$

$$C_{\text{tempF}} = 1$$

$$C_{\text{confF}} = 0.62$$

$$S_{eF} = 0.5 S_{uF} \cdot C_{cargaF} \cdot C_{tamanoF} \cdot C_{supF} \cdot C_{tempF} \cdot C_{confF} = 1.096 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Se emplea la siguiente ecuación para determinar el factor de seguridad de la flecha y así comprobar o no si el diámetro seleccionado es el correcto.

$$d_F = 50\text{mm} = 0.05 \text{ m}$$

$$FS_F = \frac{1}{\frac{16}{\pi \cdot d_F^3} \left[4 \cdot \left(\frac{M_{aF}}{S_{eF}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{T_{aF}}{S_{eF}} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{M_{mF}}{S_{yF}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{T_{mF}}{S_{yF}} \right)^2 \right]^{0.5}}$$

$$FS_F = 1.937$$

3.4.2.4 SELECCIÓN DE CHUMACERAS

Se seleccionan chumaceras para los rodillos de 800, 600 y 150 mm de diámetro, al igual que para las flechas diseñadas previamente.

Se emplea el catálogo de SKF (SKF, 2013) para seleccionar las chumaceras correspondientes.

Primero se determinan la carga dinámica y estática para cada rodillo.

$$P_{D800} = C_{supR800} = 6.367 \times 10^3 \text{ N}$$

Factor de seguridad recomendado SKF:

$$S_0 = 2$$

$$C_{E800} = S_0 C_{supR800} = 1.273 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C_D}{P_D} \right)^3 \text{ Vida nominal requerida en millones de ciclos}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \cdot L_{10} \text{ Vida nominal requerida en horas}$$

Del catálogo se obtiene una vida nominal requerida de 25000 horas de operación.

$$L_{10h} = 25000 \text{ horas}$$

$$n_{R800} = 15.9 \text{ rpm}$$

$$L_{10} = \frac{L_{10h} \cdot 60 \cdot n_{R800}}{10^6} = 23.865 \text{ Millón ciclos}$$

$$C_{D800} = L_{10}^{\frac{1}{3}} \cdot P_{D800} = 1.833 \times 10^4 \text{ N}$$

La Tabla 13 muestra la carga dinámica y estática para cada rodillo.

Tabla 13

Cargas en chumaceras

Diámetro del rodillo [mm]	Diámetro del eje [mm]	Carga dinámica C [kN]	Carga estática Co [kN]
800	60	18.33	12.73
600	60	18.24	12.67
150	30	12.58	8.736

La Tabla 12 muestra el modelo seleccionado de chumacera para cada diámetro de eje. Se requieren chumaceras de piso, pared y corredera. (Ver figura 50.)

Tabla 14

Chumaceras seleccionadas

Modelo	Diámetro del eje [mm]	Carga dinámica C [kN]	Carga estática Co [kN]
SY 60 TF	60	52.7	36
SY 30 TF	30	19.5	11.2
FY 30 TF	30	19.5	11.2
TU 30 TF	30	19.5	11.2

Fuente: (SKF, 2013)

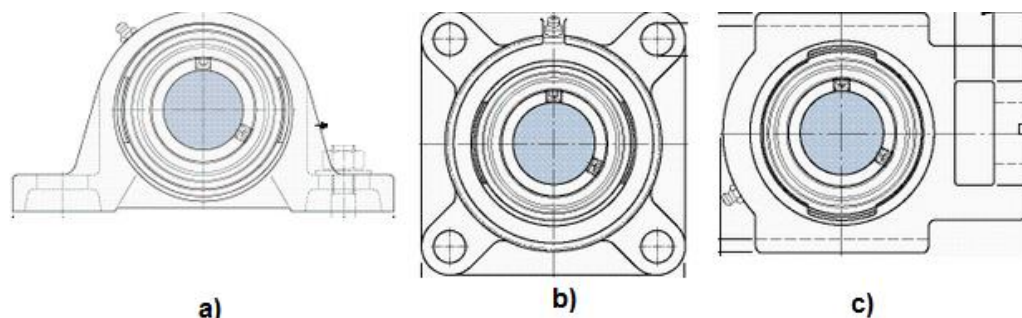


Figura 50 Tipo de chumaceras
a) Piso b) Pared y c) Corredera

3.5 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

La tensión de la lámina se controla mediante una etapa intermedia denominada bailarina (Figura 51). Dicha etapa consta simplemente de un rodillo de paso con movimiento vertical delimitado por carriles en sus extremos. La lámina es la encargada de subir o bajar dicho rodillo, el cual conectado a un encoder (SICK, 2014) permite la sincronización de ambos motores para mantener la lámina en el nivel medio de la bailarina y así lograr una tensión baja.

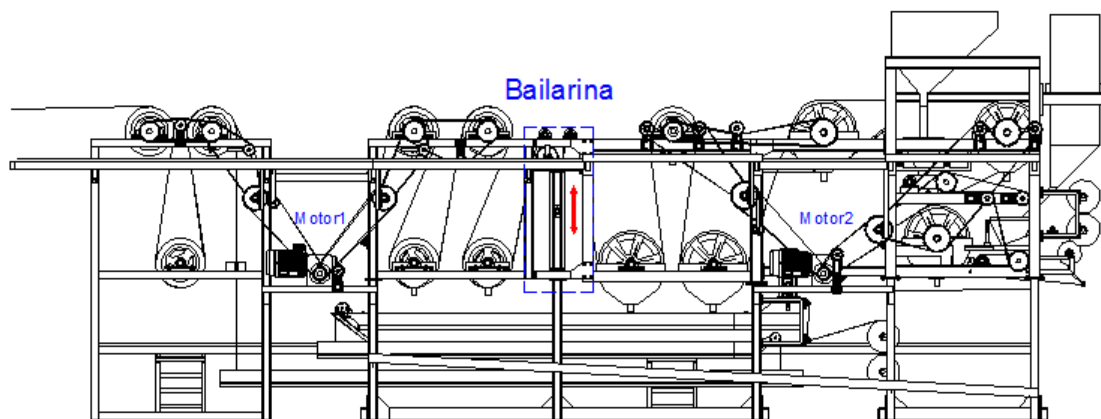


Figura 51 Bailarina

3.5.1 INSTRUMENTACIÓN

El único elemento que da información al sistema de control es un encoder, el cual mediante un cable sujeto al rodillo de la bailarina determina su posición y envía esta información como variación en el amperaje.

El modelo del encoder y los datos técnicos del mismo se adjuntan en el ANEXO A.

3.5.2 CONTROL

El control se realiza mediante un PLC, el cual recibe los datos de entrada del encoder y de acuerdo a la programación del mismo, mediante variadores de frecuencia, cambia la velocidad de los motores 1 y 2, para tratar de mantener el rodillo en una posición media (11-13 mA).

Chova del Ecuador usa dispositivos programables (PLC), suministrados por la empresa Ecuainsetec, la misma que se encarga de realizar la programación del PLC así como calibraciones y conexiones requeridas.

3.5.3 SISTEMA ELÉCTRICO

Todas las conexiones eléctricas de esta etapa y de toda la línea en general son realizadas por la empresa Ecuainsetec, los planos eléctricos se muestran en el ANEXO B.

3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERIAS

El dimensionamiento de las tuberías requeridas para la alimentación y el drenaje de agua de los rodillos autoenfriados y de las bandejas de enfriamiento, es realizado por el departamento de mantenimiento y proyectos de la empresa Chova del Ecuador. En el ANEXO C se muestra el plano correspondiente para la etapa de enfriamiento. Adicionalmente se consideró la instalación de 8 flautas para el enfriamiento de las láminas autoprotegidas, dichas flautas, con una capacidad de 3 gpm (Galones por minuto) cada una, mojan el lado de la lámina que tiene recubrimiento de polietileno, mejorando así el enfriamiento.

CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se presentan los planos, materiales y diagramas de flujo requeridos para la construcción, montaje e implementación de la estación de enfriamiento del presente proyecto.

4.1 PLANOS CONSTRUCTIVOS

Ver ANEXO D.

4.2 CONSTRUCCIÓN

En la estructura y en los elementos como son: las bandejas, estaciones para alimentación de polietileno, apoyos para chumaceras y demás elementos detallados en los plano, se emplean principalmente tubos estructurales cuadrados y rectangulares, platinas y planchas de acero. La lista completa de materiales se detalla en la Tabla 15.

Los planos anexados y los diagramas de proceso son la guía base para la construcción de la estación de enfriamiento.

Los diagramas de proceso a continuación se elaboran en conformidad con la norma ASME “Standard Operation and Flow Process Charts”, dichos diagramas son un método gráfico para explicar los pasos a seguir en un procedimiento.

En la norma se definen 5 actividades representadas por símbolos, los mismos que se detallan en la Tabla 16.

Tabla 15

Materiales y herramientas

Descripción	Dimensiones [mm]	Cantidad
Tubo estructural cuadrado	100x5 L: 6000	3
Tubo estructural cuadrado	100x4 L: 6000	9
Tubo estructural cuadrado	50x3 L:6000	18
Tubo estructural cuadrado	30x3 L:6000	19
Tubo estructural rectangular	150x50x3 L:6000	3

Continua →






Tubo estructural rectangular	100x50x3 L:6000	11
Tubo estructural rectangular	60x40x3 L:6000	4
Ángulo estructural	30x4 L:6000	1
Ángulo estructural	30x3 L:6000	6
Ángulo estructural	50x6 L:6000	1
Ángulo estructural	100x10 L:6000	1
UPN 100	100x50 L:6000	1
Tubo redondo	Ø 1" SCH40 L:6000	2
Tubo redondo galvanizado	Ø 3/4" SCH40 L:6000	5
Platina	12x100 L: 6000	4
Platina	6x100 L: 6000	1
Platina	12x50 L: 6000	1
Platina	9x50 L: 6000	2
Canal U	200x50x3 L: 6000	1
Canal U	150x50x3 L: 6000	1
Planchas de acero	1220x2440x3	2
Planchas de acero	1220x2440x12	2
Planchas de acero galvanizado	1220x2440x2	13
Eje SAE 1018	Ø 2" L: 4800	1
Barra cuadrada	9x9 L: 6000	1
Pernos Gr.8 UNC	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 1" (25.4 mm)	288
Pernos Gr.8 UNC	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 1.5" (38.1 mm)	48
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 3/4" (19.05 mm)	60
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 1" (25.4 mm)	20
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 1.5" (38.1 mm)	100
Pernos Gr.8 UNC	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 2" (50.8 mm)	44
Pernos Gr.8 UNC	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 2.5" (63.5 mm)	32
Pernos de anclaje	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 3" (76.2 mm)	4

Continúa →

Pernos de anclaje	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 4" (76.2 mm)	14
Arandelas estriadas	Ø 1/2" (12.7mm)	336
Arandelas estriadas	Ø 3/8" (9.52mm)	180
Arandelas estriadas	Ø 5/8" (15.88mm)	44
Arandelas planas	Ø 1/2" (12.7mm)	36
Arandelas planas	Ø 3/8" (9.52mm)	88
Arandelas planas	Ø 5/8" (15.88mm)	50
Tuercas UNC	Ø 1/2" (12.7mm)	44
Tuercas UNC	5/8" (15.88mm)	40
Herramientas		
Flexómetro		2
Pie de rey		1
Escuadra		2
Juego de llaves		1
Amoladora		2
Taladro de mesa		1
Taladro portátil		1
Juego de machuelos		3
Pistola y boquilla para oxicorte		1
Soldadora		2

Tabla 16

Simbología para diagramas de flujo

Símbolo	Descripción
	Operación Ocurre cuando un objeto es transformado intencionalmente en cualquiera de sus características físicas o químicas, montado o desmontado de otro objeto, arreglado o reparado para otra operación, transporte, inspección o almacenaje. También incluye recepción o entrega de información, planeación o cálculos.
	Transporte Movimiento de un objeto de un lugar a otro, excepto cuando dichas movimientos son parte de la operación o cuando se sacan elementos para inspección.
	Inspección Ocurre cuando el objeto es examinado para identificación o cuando se verifica cantidad y calidad de sus características.
	Retraso Se produce un retraso cuando las condiciones no permiten o exigen más de la siguiente acción planificada.
	Almacenaje Se almacena un objeto para mantenerlo protegido de una eliminación no autorizada.

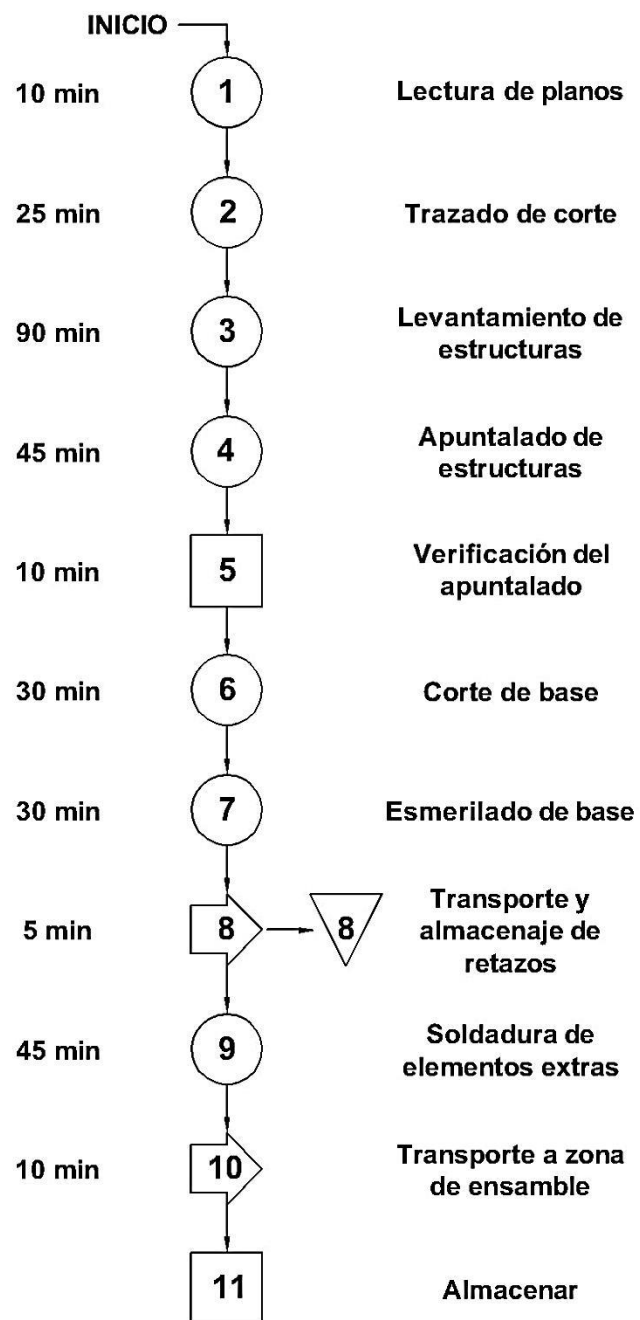
Fuente: (A.S.M.E, 1947)

Se emplean diagramas de flujo para los procesos de: modificación de elementos existentes, corte de elementos estructurales, elaboración de placas roscadas y ensamble de partes.

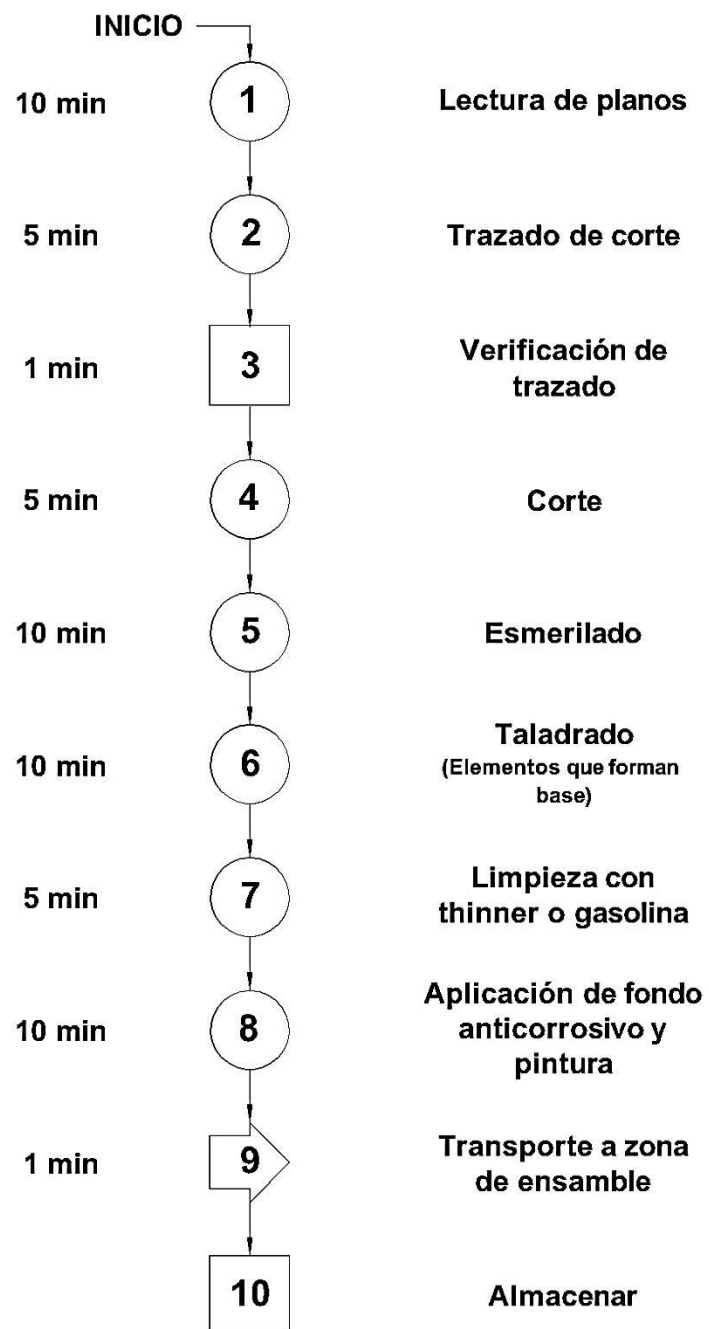
Todo esto parte de los planos anexados por lo que las operaciones de diseño y elaboración de planos se excluyen de los diagramas.

En el ANEXO E se muestran fotografías de los procesos de construcción, montaje e implementación de la estación.

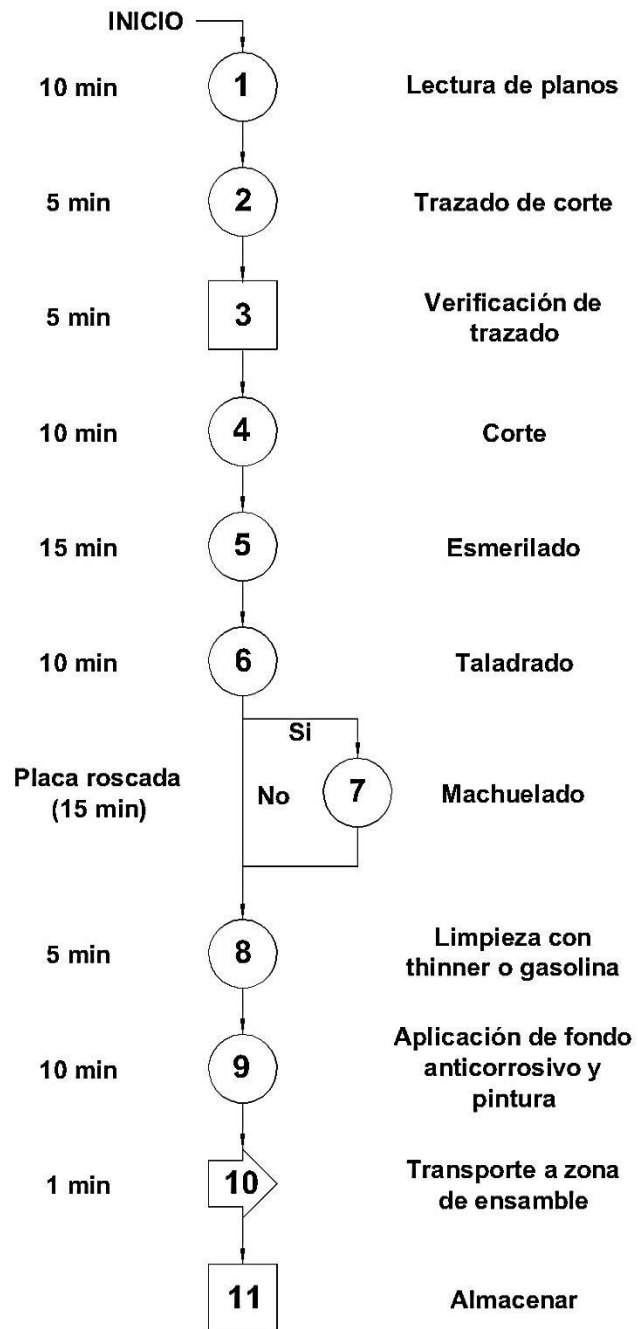
Modificación de elementos existentes (Dr. Reiser)



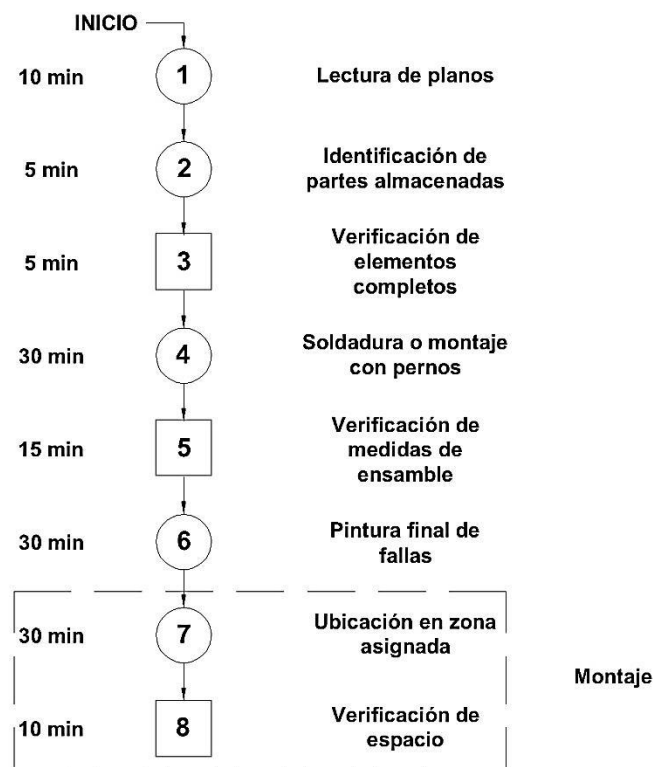
Corte de elementos estructurales



Elaboración de placas roscadas



Ensamble y montaje de partes



4.3 IMPLEMENTACIÓN

Con la estructura lista y los elementos faltantes entregados por los proveedores completos, se procede a implementar todos ellos en la estación. Dichos elementos se resumen en la Tabla 15 y la ubicación de cada uno se detalla en los planos de conjunto en el ANEXO D.

El Blower que se menciona en la Tabla 15, permite el secado de las láminas antes de que estén ingresen al compensador de producto terminado. Se seleccionó uno igual al que se usa en la planta de Cashapamba. Las especificaciones se muestran en el ANEXO F.

Las figuras a continuación muestran la implementación de algunos de los elementos listados como son: Blower (Figura 52), Motor 1 y 2 (Figuras 53 y 54). La Figura 55 muestra una fotografía de la estación de enfriamiento.

Tabla 17

Elementos a implementar

Descripción	Cantidad
Uñetas para rollos de polietileno	4 unidades
Ejes de paso de polietileno	5 unidades
Carro para rollos de polietileno	1 unidad
Motor [7.5 Hp]	2 unidades
Tensores de cadena	10 unidades
Rodillos Boato	8 unidades
Piñones	16 unidades
Chumaceras	62 unidades
Cadena paso 80	64 metros
Embudos de recolección rodillos de enfriamiento	13 unidades
Bandejas de enfriamiento	3 unidades
Encoder	1 unidad
Rodillos de paso	13 unidades
Grating	27 metros
Sistema de prensado	1 unidad
Lamina sin protección	1 unidad
Blower	1 unidad



Figura 52 Blower



Figura 53 Motor 1



Figura 54 Motor 2



Figura 55 Estación de enfriamiento

CAPÍTULO 5: PRUEBAS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas a la estación de enfriamiento, tanto para láminas autoprotegidas como no protegidas.

5.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS

La estación de enfriamiento tiene como objetivo principal reducir la temperatura de las láminas impermeabilizantes, para que las mismas puedan ser enrolladas fácilmente, garantizando un producto de calidad y permitiendo el aumento de producción.

Adicionalmente se verifica la sincronización de la velocidad de los motores mediante la bailarina.

Se emplean reportes técnicos de prueba como procedimiento para comprobar lo expuesto anteriormente. Dichos reportes son documentos oficiales que constan de un objetivo, metodología y resultados.

5.2 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Tanto para el enfriamiento como para la bailarina se definen parámetros cuantificables que son:

Enfriamiento de láminas (Ver Figura 56)

- Temperatura del mastico en la balsa de impregnación (1)
- Temperatura de entrada (2)
- Temperatura ambiente
- Temperatura en la salida de la estación (3)
- Temperatura del agua
- Temperatura en la entrada de la enrolladora (4)
- Velocidad de laminación
- Tiempo transcurrido de producción

Bailarina

- Posición de la bailarina (medición del encoder)
- Velocidad de los motores
- Tiempo transcurrido de producción

5.3 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Los reportes técnicos se encuentran en el ANEXO G.

5.4 EVALUACION DE RESULTADOS

La Figuras 56 muestra la variación de la temperatura antes del proceso de enrollado durante el tiempo de producción, tanto para las láminas no protegidas y autoprotegidas tomadas como objeto de prueba.

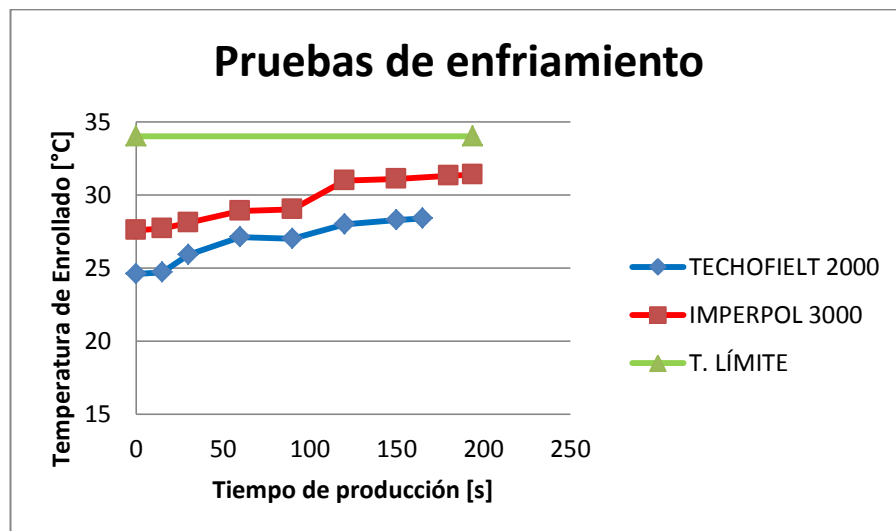


Figura 56 Resultados de la prueba de enfriamiento

Cómo se observa, la temperatura de enrollado se mantiene por debajo del límite requerido, lo cual permite aumentar la velocidad de producción generando una mayor eficiencia en los procesos de la empresa.

Adicionalmente, en la Figura 57 se observa una mejora en la presentación de los productos no protegidos, en relación con los actuales rollos ofertados por Chova del Ecuador. La mejora en la presentación se debe al sistema de prensado de estos productos, el cual elimina las burbujas

de aire casi en su totalidad. Adicionalmente, el enfriamiento adecuado que se obtuvo evita que el polietileno se quemara al contacto con la lámina.



Figura 57 Mejora en la presentación del producto

La Figura 58 muestra la variación en la posición de la bailarina. Se debe tener en cuenta que 4 mA representan el límite inferior y 20 mA el superior, lo ideal es que se mantenga en un valor medio equivalente a 12 mA, no obstante, en las pruebas se evidencia que sube sobre este valor pero no llega al límite superior. El resultado evidenciado es aceptable, puesto que el objetivo principal de la bailarina, a más de sincronizar velocidades, es evitar generar tensión en la lámina.

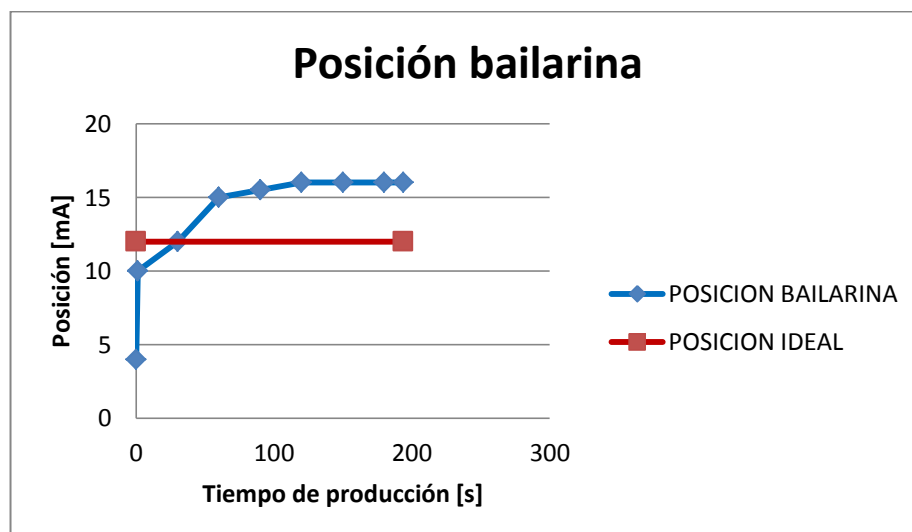


Figura 58 Prueba de funcionamiento bailarina

5.5 MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

Ver ANEXO H.

CAPÍTULO 6: ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

En el presente capítulo se determina el costo total de fabricación del proyecto y se evalúa la rentabilidad del mismo, tomando en cuenta indicadores económicos. De igual manera se analiza económicamente las ventajas que trae para la empresa la implementación del proyecto.

6.1 ESTUDIO FINANCIERO

En el estudio financiero se detalla el costo total de la construcción e implementación de la estaciones de enfriamiento y tracción de la línea de producción de las láminas asfálticas.

6.1.1 COSTO DE MATERIALES DIRECTOS

El costo de los materiales se detalle en las Tabla18, 19 y 20, en estas se incluyen todos los materiales, accesorios y consumibles requeridos.

Tabla 18

Costo de Materiales

Descripción	Dimensiones [mm]	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio Total [\$]
Tubo estructural cuadrado	100x5 L: 6000	3	88.18	264.54
Tubo estructural cuadrado	100x4 L: 6000	9	70.54	634.86
Tubo estructural cuadrado	50x3 L:6000	18	24.85	447.30
Tubo estructural cuadrado	30x3 L:6000	19	11.30	214.70
Tubo estructural rectangular	150x50x3 L:6000	3	53.78	161.34
Tubo estructural rectangular	100x50x3 L:6000	11	43.65	480.15
Tubo estructural rectangular	60x40x3 L:6000	4	26.38	105.52
Ángulo estructural	30x4 L:6000	1	13.10	13.10
Ángulo estructural	30x3 L:6000	6	9.82	58.92
Ángulo estructural	50x6 L:6000	1	44.24	44.24
Ángulo estructural	100x10 L:6000	1	89.80	89.80

Continua →

UPN 100	100x50 L:6000	1	81.68	81.68
Tubo redondo	Ø 1" SCH40 L:6000	2	30.21	60.42
Tubo redondo galvanizado	Ø 3/4" SCH40 L:6000	5	32.54	162.70
Platina	12x100 L: 6000	4	73.99	295.96
Platina	6x100 L: 6000	1	39.92	39.92
Platina	12x50 L: 6000	1	37.00	37.00
Platina	9x50 L: 6000	2	27.75	55.50
Canal U	200x50x3 L: 6000	1	38.05	38.05
Canal U	150x50x3 L: 6000	1	31.52	31.52
Planchas de acero	1220x2440x3	2	58.49	116.98
Planchas de acero	1220x2440x12	2	217.84	435.68
Planchas de acero galvanizado	1220x2440x2	13	38.81	504.53
Eje SAE 1018	Ø 2" L: 2400	2	76.60	153.20
Eje SAE 1018	Ø 1" L: 1700	5	24.50	122.5
Barra cuadrada	9x9 L: 6000	1	4.31	4.31
Pernos Gr.8 UNC	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 1" (25.4 mm)	288	0.25	70.79
Pernos Gr.8 UNC	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 1.5" (38.1 mm)	48	0.37	17.76
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 3/4" (19.05 mm)	60	0.19	11.40
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 1" (25.4 mm)	20	0.21	4.20
Pernos Gr.8 UNC	Ø 3/8" (9.52 mm) L: 1.5" (38.1 mm)	100	0.32	31.50
Pernos Gr.8 UNC	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 2" (50.8 mm)	44	0.64	28.16
Pernos Gr.8 UNC	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 2.5" (63.5 mm)	32	0.78	24.96
Pernos de anclaje	Ø 1/2" (12.7 mm) L: 3" (76.2 mm)	4	0.76	3.04
Pernos de anclaje	Ø 5/8" (15.88 mm) L: 4" (76.2 mm)	14	0.94	13.16
Arandelas estriadas	Ø 1/2" (12.7mm)	336	0.34	114.24
Arandelas estriadas	Ø 3/8" (9.52mm)	180	0.29	52.20
Arandelas estriadas	Ø 5/8" (15.88mm)	44	0.32	14.08

Continúa →

Arandelas planas	∅ 1/2" (12.7mm)	36	0.12	4.32
Arandelas planas	∅ 3/8" (9.52mm)	88	0.09	7.92
Arandelas planas	∅ 5/8" (15.88mm)	50	0.19	9.50
Tuercas UNC	∅ 1/2" (12.7mm)	44	0.12	5.28
Tuercas UNC	5/8" (15.88mm)	40	0.24	9.60
TOTAL				5076.53

Tabla 19**Costo de accesorios**

Descripción	Detalle o Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio Total [\$]
Rodillo de paso estándar	∅ 6" (152.4mm)	4	649.60	2598.4
Rodillos autoenfriados Boato	∅ 600 mm	8	4610	36880
Chumacera piso SKF	SY 60 TF	16	107.78	1724.48
Chumacera piso SKF	SY 50 TF	6	64.45	386.70
Chumacera piso SKF	SY 30 TF	6	36.24	217.44
Chumacera piso SKF	SY 25 TF	12	25.74	308.88
Chumacera pared SKF	FY 30 TF	6	53.34	320.04
Chumacera pared SKF	FY 25 TF	16	31.36	501.76
Chumacera corredera SKF	TU 30 TF	2	47.84	95.68
Rodamiento de bolas SKF	6308 – 2RS1	2	33.73	67.46
Rodamiento de bolas NTN	6806	20	35.09	701.80
Piñón simple con manzana	Z 18 Paso 80	16	39	624
Piñón simple con manzana	Z 30 Paso 80	8	97	776
Piñón simple con manzana	Z 36 Paso 80	2	119	238
Cadena simple	Paso 80 (25.4mm)	42 m	7.50	315

Continua →

Candado para cadena	Paso 80 (25.4mm)	12	1.38	16.56
Medio candado para cadena	Paso 80 (25.4mm)	12	2.82	33.84
Conjunto motor y reducto	7.5 hp	2	2508	5016
Encoder	BCG05-K1KM01PP	1	721.05	721.05
Cable para conexión	-	1	30.97	30.97
KIT Blower para secado	20 hp	1	18157.34	18157.34
Carro para polietileno	-	1	1000	1000
TOTAL				70131.40

Tabla 20**Costo de consumibles**

Descripción	Dimensión	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio Total [\$]
Electrodo 6010	1/8 "	20 kg	3.36	67.2
Electrodo 6010	1/8 "	14 kg	5.98	83.72
Disco de corte	7"x1/8"x7/8"	16	3.88	62.08
Disco de desbaste	7"x1/4"x7/8"	12	3.88	46.56
Tiza para trazado	-	6	0.25	1.5
Oxigeno 10 m ³	-	2	36	72
Pintura base anticorrosiva	-	2 Caneca	64.20	128.4
Pintura externa	-	2 Caneca	29.72	59.44
TOTAL				520.90

6.1.2 COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA

En el costo de mano de obra directa se considera el gasto del personal que realiza las operaciones de construcción y montaje para el presente proyecto. En la Tabla 21 se detallan estos costos, así como los costos de: fabricación de bandejas y de instalación del sistema de tuberías y el sistema eléctrico.

Tabla 21**Costo de mano de obra directa**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio Total [\$]
Soldador	Semana	8	267.44	2139.52
Cortador/Ensamblador	Semana	8	140	1120
Pintor	Semanas	2	140	280
OTROS				
Fabricación de bandejas	-	1	1700	1700
Instalación de tuberías	-	1	2000	2000
Instalaciones eléctricas	-	1	600	600
			TOTAL	7839.52

6.1.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

En la Tabla 22 se muestra el costo total del proyecto tomando en cuenta todos los costos directos para la fabricación e implementación del presente proyecto.

Tabla 22**Costo total del proyecto**

Descripción	Costo Total [\$]
Costo de materiales	5076.53
Costo de accesorios	70131.40
Costo de consumibles	520.90
Costo de mano de obra	7839.52
TOTAL	83568.35

6.2 ESTUDIO ECONÓMICO

En el estudio económico se justifica la rentabilidad del proyecto mediante el uso de los indicadores: T.I.R.², V.A.N.³ y la relación costo – beneficio.

Con la implantación del presente proyecto se duplica la capacidad de producción de láminas asfálticas con armadura, esto se debe a que el correcto enfriamiento permite que la nueva línea alcance su capacidad instalada de 40 m/min.

Adicionalmente, se estima reducir la cantidad de producto no conforme en al menos un 50%. La falta de enfriamiento trae como consecuencia

² Tasa interna de retorno

³ Valor actual neto

principal la fundición total o parcial del polietileno que conforma las láminas impermeabilizantes. Lo cual, además de ser un defecto por sí solo, produce que el asfalto modificado se pegue en los rodillos generando acumulaciones, denominadas pepas. Dichas pepas pueden causar la ruptura de la lámina o en su defecto se unen a la misma.

El presente estudio económico se basa en la producción de la línea de laminación de Cashapamba durante el año 2014.

En la Tabla 23 se detalla la cantidad de producto no conforme para algunas de las láminas con armadura ofertadas por la empresa.

Tabla 23

Producto no conforme

Producto	Producción total [m ²]	Producto no conforme [m ²]	Causa
Super K	3760	210	Polietileno quemado
Techofielt 1500 (Arena y polietileno)	4060	160	Generación de pepas
Imperpol 3000	4050	50	Generación de pepas
Imperglas 4000	3030	110	Generación de pepas
Imptek parking	4800	350	Generación de pepas
TOTAL	19700	880	

Fuente: (IMPTEK, 2014)

El porcentaje de producto no conforme, considerando los datos mostrados en la Tabla 23, es del 4.46%.

En el 2014, en la planta de Cashapamba, se produjo un promedio de 72400 m² de lámina impermeabilizante con armadura, de la cual el 4.46 % se desperdicia por las causas antes mencionadas.

Tomando en cuenta un valor de producción promedio de 5 \$/m² se determina una pérdida promedio anual de \$ 16145.

Con la implementación del actual proyecto se reducirá en al menos la mitad el desperdicio generado, adicionalmente se reduce la intervención de operarios de 5 a 3 y se duplica la producción.

En la Tabla 24 se muestra los resultados económicos anuales de los beneficios antes mencionados. Se toma en cuenta un sueldo mensual de \$800.

Tabla 24

Beneficio económico anual

Descripción	Total anual [\$]
Reducción de desperdicio	16145
Reducción de mano de obra	19200
TOTAL	35345

En la Tabla 25 se observa los resultados del análisis económico proyectado a 10 años. En esta tabla se considera al valor total de la Tabla 24 como ingreso y como egreso al valor total para la fabricación y montaje del proyecto (\$ 83 568).

Tabla 25
Análisis económico

Año	Inversión [\$]	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Egresos [\$]	-83568	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ingreso [\$]	0	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345
Saldo [\$]	-83 568	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345	35 345
Saldo acumulado [\$]	-83 568	-48 223	-12 878	22 467	57 812	93 157	128 502	163 847	199 192	234 537	269 882

Tabla 26
Índices económicos – financieros

Índice económico-financiero	Valor
V.A.N	\$ 116 139
T.I.R.	41 %
Relación B/C	2.68
Tiempo de recuperación	2.36 años
Tasa de descuento	12 %

A continuación se interpretan los valores de los índices económicos – financieros de la Tabla 25.

VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.)

Mediante este indicador se calcula los flujos de ingresos y egresos futuros que representa el proyecto. Mediante el V.A.N. se evalúa la rentabilidad del proyecto, de manera que si este valor es mayor a la inversión inicial se afirma que el proyecto es rentable, como en este caso.

TASA INTERNA DE RETORNO (T.I.R.)

La rentabilidad del proyecto también se evalúa mediante este indicador. Así si el T.I.R., que representa la tasa máxima de descuento permitida es mayor a la tasa de descuento real se considera que el proyecto es rentable.

RELACION BENEFICIO – COSTO (B/C)

En esta relación se analiza la razón entre los beneficios acumulados para el periodo de tiempo dado y la inversión inicial. En el proyecto actual este valor es de 2.68, lo que quiere decir que por cada dólar invertido se obtiene \$ 1.68 de ahorro.

TIEMPO DE RECUPERACIÓN

En el tiempo de recuperación se calcula el periodo de tiempo para cuando se recupera la inversión inicial. En este caso este periodo es de 2.68 años equivalente a 2 años, 8 meses y 5 días. Después de este tiempo se considera a todo ingreso como ganancia.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e implementó la estación de enfriamiento para láminas asfálticas impermeabilizantes en la línea de producción de la planta el Inga de la empresa Chova del Ecuador s.a. La estación de enfriamiento se basa en un análisis de transferencia de calor para estado no transitorio, mediante el cual se logró determinar la distancia de enfriamiento requerida para las láminas no protegidas.
- Se diseñó y construyó dos sistemas de enfriamiento, uno para cada tipo de lámina con armadura. El primero, para láminas autoprotegidas, se conforma de un juego de rodillos enfriados internamente, y en el segundo sistema se cuenta con tres bandejas para la sumersión de la lámina sin autoprotección.
- Se diseñó y construyó el sistema de tracción que permite alcanzar la velocidad de laminación requerida de 40 m/min y además el sistema permite controlar la tensión de la lámina evitando rupturas del producto y consecuentemente paradas de producción.
- Se comprobó, mediante pruebas de funcionalidad, que la temperatura de la lámina sea menor a los 34 °C antes de la etapa de enrollado, y se garantiza así el correcto enfriamiento de las láminas impermeabilizantes con armadura, lo que permite alcanzar la velocidad de producción deseada de 40 m/min.
- Se logró generar la recirculación del agua en el sistema de enfriamiento mediante la disposición en bandejas, manteniendo así una temperatura constante, lo que no sucede en la piscina de enfriamiento de la antigua línea de laminación. Esta disposición también es más segura para el personal de producción.

- Se implementó un sistema de prensado para las láminas no protegidas al inicio de la etapa de enfriamiento, lo cual a más de garantizar la adherencia del polietileno genera una mejor presentación del producto.
- Se requirió una inversión de \$ 83 568, monto que será recuperado en menos de los tres primeros años de operación de la máquina.
- Se obtiene un beneficio económico de aproximadamente 35 000 dólares anuales, esto de acuerdo al análisis económico y financiero realizado.
- Se redujo la mano de obra directa, lo que permite reducir costos de producción y presentar así precios más competitivos al mercado.
- Se realizó el proyecto actual con todos los conocimientos adquiridos en la Universidad de las Fuerzas Armadas – Espe.

7.2 RECOMENDACIONES

- Revisar los planos constructivos, eléctricos y de tuberías en caso de realizar cualquier mejora o trabajo de mantenimiento a cualquiera de los dos sistemas.
- Realizar periódicamente las acciones de mantenimiento preventivo que se exponen en el manual de funcionamiento.
- Tomar las debidas precauciones para la operación de los sistemas de tracción.
- Realizar pruebas de funcionalidad periódicamente, esto permite llevar un control del sistema y en base a esto realizar cualquier mejora del mismo.
- Tomar en cuenta el uso del EPP (Equipo de protección personal) tanto para la operación de la estación como para actividades de mantenimiento.
- Tomar en cuenta todas las precauciones indicadas en las hojas técnicas, tanto para el encoder como para el blower.
- Se recomienda impulsar la relación entre empresa y universidad, con el fin de crear proyectos similares que pongan en práctica el conocimiento adquirido en los años de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- A.S.M.E. (1947). *Standard Operation And Flow Process Charts*. New York.
- ABB. (2005). *IEC Low Voltage Induction Motors 400 V*.
- AISC. (2004). *Serviceability Design Considerations*. United States.
- Bonilla, D. (Junio de 2014). Supervisor de producción Chova del Ecuador.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. (2002). *Heat Transfer, a practical approach*. Estados Unidos: McGraw Hill.
- Computers and Structures, I. (2011 de Febrero). Introductory Tutorial for SAP2000. Berkeley, California, USA.
- Forbo Movement Systems*. (s.f.). Obtenido de <http://www.forbo.com/>
- FPZ. (14 de Abril de 2014). *FPZ Blower Technology*. Obtenido de <http://www.fpz.com/pdf/MS0414.pdf>
- Gere, J. (2003). *Mecánica de materiales*. México, D.F.: Thomson Learning.
- IMPTEK. (2014). *IMPTEK*. Obtenido de <http://www.imptek.com/>
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor, 4a. Ed.* México: Prentice Hall.
- Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas*. México: Prentice Hall.
- Rossi. (2011). *Worm gear reducers and gearmotor*.
- SICK. (2014). Wire drwa encoders. Obtenido de <https://www.mysick.com/>
- SKF. (Junio de 2013). *SKF Group*. Obtenido de <http://www.skf.com/binary/83-129182/13728-EN-Y-bearing-and-Y-b-units.pdf>
- Straneo, & Consorti. (1969). *El dibujo técnico mecánico*. Barcelona: Montaner y Simon S.A.
- White, F. (2008). *Mecánica de fluidos*. Madrir: McGraw Hill.

ANEXOS