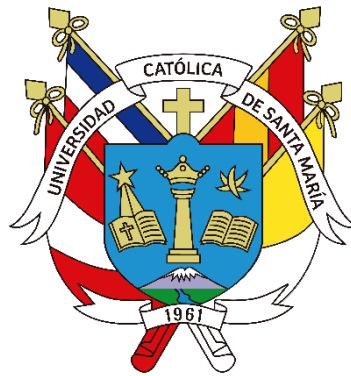


**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-Eléctrica**



**Diseño, modelamiento y análisis termodinámico de una planta de  
evaporación de agua de cola con el uso del software Engineering Equation  
Solver**

Tesis Presentada por el Bachiller:

**Llapa Luna, Denis Antonio**

**ORCID: 0009-0006-5696-7175**

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

**Dr. Valdez Loaiza, Juan Carlos**

**ORCID: 0000-0002-4122-2027**

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA MECANICA-ELECTRICA**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 20 de Noviembre del 2024

**Dictamen: 010468-C-EPIMMEM-2024**

Visto el borrador del expediente 010468, presentado por:

**2017701431 - LLAPA LUNA DENIS ANTONIO**

Titulado:

**DISEÑO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UNA PLANTA DE EVAPORACION  
DE AGUA DE COLA CON EL USO DEL SOFTWARE ENGINEERING EQUATION SOLVER**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICO**

**29569057 - CASTILLO CACERES CESAR PIO  
DICTAMINADOR**



**29387211 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO  
DICTAMINADOR**



**30857994 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO  
DICTAMINADOR**



# Diseño, modelamiento y análisis termodinámico de una planta de evaporación de agua de cola con el uso del software Engineering Equation Solver

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>20%</b>	<b>19%</b>	<b>4%</b>	<b>3%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.uns.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>3%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.unsa.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>4</b>	<b>minem.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>pdfcookie.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.unp.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>www.dspace.espol.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>repositorio.ulead.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>9</b>	<b>www.coursehero.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>10</b>	<b>repositorio.ucsm.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>11</b>	<b>INGENIEROS INNOVADORES PROYECTISTAS AMBIENTALES E.I.R.L.. "Actualización del</b>	<b>1%</b>

## DEDICATORIA

*Dedico el resultado de este logro personal a mis queridos padres; Marcos y Mirtha, por brindarme los pilares de mi educación y formación profesional. Estoy y estaré eternamente agradecidos por todo lo que me han dado, no hay palabras suficientes para expresar lo mucho que los amo. Gracias por cada sacrificio, por cada consejo y por el inmenso amor que siempre me han brindado.*

*Hermanos queridos; Arabela, Erika y Gian, crecer con ustedes ha sido una aventura llena de risas, complicidad y aprendizajes. Son mis compañeros de travesuras, mis confidentes y mis cómplices en cada locura. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus palabras de aliento y por ser esa clase de hermanos inigualables que alegraron mi vida. ¡Los quiero mucho!*

*Y, a mis queridos amigos; Carlos C, Carlos S, Renato, David, Pablo y Gian Carlo. No hay palabras suficientes para expresar cuánto valoro su amistad. Gracias por estar a mi lado en los momentos buenos y en los difíciles, por las risas interminables, así como los consejos sinceros. Porque en cada aventura, en cada conversación y en cada recuerdo compartido, encuentro razones para sentirme afortunado de haberlos conocido.*

*Finalmente, quiero dedicar este logro a Dios y a mi querida prima Aracely, que en paz descansa. Sé que ella habría sido una de las primeras en celebrar este momento a mi lado. Aunque no esté físicamente aquí, siempre te llevaré en mi corazón, prima. Estés donde estés, tu amor y apoyo siguen siendo un gran y hermoso recuerdo en mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

*Es grato expresar mis agradecimientos a los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica que me han acompañado a lo largo de mi formación académica.*

*Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Juan Carlos Valdez Loaiza por su invaluable experiencia, conocimientos y colaboración a lo largo del desarrollo de esta tesis.*



## RESUMEN

Este trabajo de investigación aborda el diseño y análisis termodinámico de una planta de evaporación de agua de cola en la industria pesquera en Trujillo, Perú. Optimizando el aprovechamiento de la energía térmica residual de los secadores Rotatubos y secadores rotadiscos, cumpliendo con las normativas energéticas y ambientales. Incluye la simulación del proceso con el software Engineering Equation Solver (EES), el diseño mecánico en Autodesk Inventor y el análisis estructural con Ansys.

Para el desarrollo de esta investigación, se llevó a cabo un análisis detallado del flujo de materia y energía en la planta evaporadora, teniendo en cuenta tanto la eficiencia energética como las restricciones mecánicas del sistema. El diseño propuesto tiene como objetivos principales maximizar la eficiencia energética del proceso, reducir las emisiones de gases contaminantes y optimizar el aprovechamiento de los subproductos generados. El modelo termodinámico, respaldado por simulaciones, mostró una notable mejora en el rendimiento energético, lo que sugiere un impacto positivo en la sostenibilidad operativa de la planta a largo plazo.

Las simulaciones mostraron que la concentración en la planta diseñada es conservadora, con un valor promedio de 4,27 frente a 4,99 y 4,72 en las plantas de referencia. El diseño mecánico, validado con Autodesk Inventor 2025 y ANSYS 2024 R2, demostró que los componentes críticos cumplen con los requisitos de seguridad, presentando factores de seguridad superiores a 2,0 y deformaciones mínimas, lo que asegura la fiabilidad del diseño ante variaciones operativas.

**Palabras clave:** Planta de evaporación de agua de cola, Secadores Rotadiscos, Secadores Rotatubos.

## ABSTRACT

This research focuses on the thermodynamic design and analysis of an evaporative water treatment plant in the fishmeal industry in Trujillo, Peru. It optimizes the utilization of residual thermal energy from Rotatubos dryers and Rotadisks dryers, complying with applicable energy and environmental regulations. The process simulation was conducted using Engineering Equation Solver (EES) software, mechanical design in Autodesk Inventor, and structural analysis with Ansys.

For the development of this research, a detailed analysis of the material and energy flow in the evaporator plant was carried out, considering both energy efficiency and the mechanical constraints of the system. The proposed design aims to maximize process energy efficiency, reduce pollutant gas emissions, and optimize the utilization of by-products generated. The thermodynamic model, supported by simulations, showed a significant improvement in energy performance, suggesting a positive impact on the long-term operational sustainability of the plant.

The simulations indicated that the concentration in the designed plant is conservative, with an average value of 4.27 compared to 4.99 and 4.72 in reference plants. The mechanical design, validated with Autodesk Inventor 2025 and ANSYS 2024 R2, demonstrated that the critical components meet safety requirements, with safety factors above 2.0 and minimal deformations, ensuring the reliability of the design under operational variations.

**Keywords:** Evaporation plant, Water treatment, Rotadisks dryers, Rotatubos dryers.

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

NOMENCLATURA

INTRODUCCIÓN ..... 1

CAPTÍTULO I..... 2

1. MARCO METODOLÓGICO..... 2

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ..... 2

1.2. ANTECEDENTES ..... 3

1.3. OBJETIVOS ..... 5

1.3.1. Objetivo General..... 5

1.3.2. Objetivos específicos ..... 5

1.4. JUSTIFICACIÓN..... 5

1.5. HIPÓTESIS..... 5

1.6. ALCANCES..... 6

1.7. LIMITACIONES..... 6

CAPTÍTULO II..... 7

2. MARCO TEÓRICO ..... 7

2.1. PLANTAS DE EVAPORACIÓN ..... 7

2.2. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA DE PESCADO..... 11

2.2.1. Esquema de Flujo del Proceso de producción de Harina de Pescado..... 11

2.2.2. Descarga, Recepción y Pesaje De Materia Prima..... 14

2.2.3. Recuperación Primaria..... 14

2.2.4. Recuperación secundaria.....	15
2.2.5. Cocción .....	16
2.2.6. Prensado .....	17
2.2.7. Tratamiento de caldos y generación de aceite de Pescado.....	17
2.2.8. Operación de Evaporación .....	19
2.2.9. Operación de Secado .....	21
2.2.10. Enfriamiento.....	24
2.2.11. Molienda .....	24
2.2.12. Ensaque y Adición de Antioxidante .....	26
2.2.13. Almacenamiento.....	26
CAPTÍTULO III.....	27
3. METODOS Y ECUACIONES DE DISEÑO.....	27
3.1. ENFOQUE Y DISEÑO .....	27
3.2. USO DEL SOFTWARE EES .....	28
3.2.1. Método de Newton Raphson .....	28
3.3. BALANCE DE MATERIA .....	29
3.4. BALANCE DE ENERGÍA.....	30
3.5. DISEÑO TERMODINÁMICO.....	30
3.5.1. Cantidad de Calor Transferido .....	30
3.5.2. Transferencia de Calor.....	31
3.6. DISEÑO MECÁNICO DE EVAPORADOR.....	32
3.6.1. Cantidad de tubos necesarios en el efecto.....	32
3.6.2. Diámetro de la coraza .....	32
3.6.3. Espesor de coraza .....	33
3.6.4. Diseño de espejos de tubos.....	35
3.6.5. Diseño de pernos de anclaje.....	35
3.6.6. Diseño de espesor de anillo base .....	36

3.6.7. Diseño de ductos de vahos .....	38
3.6.8. Diseño de tuberías de circulación y alimentación .....	38
CAPÍTULO IV. ....	40
4. INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	40
4.1. CÁLCULO DEL BALANCE DE MATERIA.....	40
4.2. CÁLCULO DEI FLUJO VAHOS Y NUMERO DE EFECTOS.....	42
4.3. CÁLCULO TERMODINAMICO.....	43
4.4. CÁLCULO MECÁNICO .....	53
4.4.1. Cálculo de cantidad de tubos.....	53
4.4.2. Cálculo del diámetro de coraza .....	54
4.4.3. Cálculo de espesor de coraza.....	55
4.4.4. Cálculo de espesor de espejo fijo .....	60
4.4.5. Cálculo de pernos de anclaje.....	62
4.4.6. Cálculo de espesor de anillo base.....	64
4.4.7. Cálculo de pernos y espesor en juntas bridadas entre cuerpos de evaporador.....	67
4.4.8. Cálculo de diámetro y espesor de ductor de vahos.....	71
4.4.9. Cálculo de tuberías de circulación y alimentación .....	74
4.4.10. Selección de bomba para sistema de bombeo en efectos.....	77
CAPÍTULO V.....	85
5. RESULTADOS.....	85
5.1. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	85
5.1.1. Análisis termodinámico de los efectos .....	85
5.1.2. Análisis de componentes mecánicos calculados .....	89
6. CONCLUSIONES .....	95
7. RECOMENDACIONES .....	96
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Unidad de tubos largos verticales de película descendente .....	10
<b>Figura 2:</b> Evaporadores de Calandria .....	11
<b>Figura 3:</b> Esquema de flujo del proceso de producción de la harina de pescado.....	13
<b>Figura 4:</b> Trommel Rotatorio .....	15
<b>Figura 5:</b> Cocina Estática Indirecta .....	16
<b>Figura 6:</b> Prensa de doble tornillo .....	17
<b>Figura 7:</b> Decantador centrífugo .....	18
<b>Figura 8:</b> Clarificador comercial de aceite de pescado o centrifuga .....	19
<b>Figura 9:</b> Planta de Evaporación de Agua de Cola.....	20
<b>Figura 10:</b> Secador Rota Discos.....	22
<b>Figura 11:</b> Secador Rotatubos.....	22
<b>Figura 12:</b> Secador de aire caliente .....	23
<b>Figura 13:</b> Molino tipo martillo .....	25
<b>Figura 14:</b> Datos de entrada del Evaporador de película descendente .....	27
<b>Figura 15:</b> Ecuación e interpretación geométrica del método de Newton Raphson .....	29
<b>Figura 16:</b> Balance de materia para una planta de 180 Tn/h .....	41
<b>Figura 17:</b> Esquema termodinámico para balance de masa y energía.....	43
<b>Figura 18:</b> Ecuaciones del balance de energía en los 3 efectos .....	48
<b>Figura 19:</b> Cálculo termodinámico en el programa EES.....	49
<b>Figura 20:</b> Coeficientes globales típicos de evaporadores.....	50
<b>Figura 21:</b> Ecuación de transferencia de calor.....	51
<b>Figura 22:</b> Área de transferencia del efecto I, II y III.....	52
<b>Figura 23:</b> Cantidad de tubos en los 03 efectos .....	53
<b>Figura 24:</b> Valor de la constante CTP en función del número de pasos por tubo.....	54
<b>Figura 25:</b> Distribución de tubos.....	54
<b>Figura 26:</b> Diámetro exterior de espejos e interior de corazas en los efectos.....	55

<b>Figura 27:</b> Espesores por costuras largas y circunferenciales.....	56
<b>Figura 28:</b> Disposición de coraza de efecto I.....	56
<b>Figura 29:</b> Espesor de la coraza debido a la presión de aire.....	57
<b>Figura 30:</b> Esfuerzo en la coraza debido al peso de los tubos y cuerpo de la coraza.....	58
<b>Figura 31:</b> Espesor de las corazas en los efectos I, II y III.....	59
<b>Figura 32:</b> Cálculo de la constante dependiente del paso entre tubos.....	60
<b>Figura 33:</b> Cálculo de espesor de espejos fijos en el efecto I.....	61
<b>Figura 34:</b> Cálculo de espesor de espejos fijos en el efecto II y efecto III.....	62
<b>Figura 35:</b> Cantidad de pernos de anclaje por efecto.....	63
<b>Figura 36:</b> Esquema de ancho total de anillo base.....	65
<b>Figura 37:</b> Espesor de anillos bases en los efectos.....	66
<b>Figura 38:</b> Esquema de ancho total de anillo base.....	69
<b>Figura 39:</b> Cantidades de pernos de anclaje y espesores en juntas bridadas.....	70
<b>Figura 40:</b> Diametro de ductos de vahos en los efectos.....	73
<b>Figura 41:</b> Diametro de tuberías de recirculación y alimentación.....	76
<b>Figura 42:</b> Diagrama de simulación en Pipe Flow.....	78
<b>Figura 43:</b> Abanico de bombas por tamaño de impulsor.....	80
<b>Figura 44:</b> Curva de operación de la bomba ISO 2858 modelo 125-250.....	81
<b>Figura 45:</b> Curva de operación de bomba de tornillo excéntrico.....	83
<b>Figura 46:</b> Delta de temperaturas a contraflujo.....	86
<b>Figura 47:</b> Variación de las áreas de transferencias.....	86
<b>Figura 48:</b> Temperatura de vapor Vs Presión de vacío.....	87
<b>Figura 49:</b> Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto I.....	87
<b>Figura 50:</b> Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto II.....	88
<b>Figura 51:</b> Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto II.....	88
<b>Figura 52:</b> Modelado de ensamble Anillo Base – Cuerpo I.....	90
<b>Figura 53:</b> Punto fijo en anillo base de efecto I.....	91

<b>Figura 54:</b> Configuración de cargas en el ensamble .....	91
<b>Figura 55:</b> Factor de seguridad y máxima deformación del cuerpo I.....	92
<b>Figura 56:</b> Deformación máxima de espejo fijo.....	92
<b>Figura 57:</b> Factor de seguridad de espejo fijo.....	93
<b>Figura 58:</b> Deformación máxima y factor de seguridad en pernos de anclaje.....	93



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	Resumen de las pros y contras de los tipos de evaporadores.....	8
<b>Tabla 2:</b>	Datos de balance de materia Balance – Industria pesquera .....	40
<b>Tabla 3:</b>	Datos de entrada de flujos de materia.....	42
<b>Tabla 4:</b>	Capacidades de evaporación de equipos.....	42
<b>Tabla 5:</b>	Datos de campo .....	45
<b>Tabla 6:</b>	Capacidades caloríficas del concentrado .....	47
<b>Tabla 7:</b>	Resultados obtenidos en el programa EES .....	50
<b>Tabla 8:</b>	Valores de las áreas de transferencia en cada efecto.....	53
<b>Tabla 9:</b>	Parámetros para el diseño mecánico.....	55
<b>Tabla 10:</b>	Esfuerzo de fluencia de pernos ASTM A193 grado B7 y B16.....	67
<b>Tabla 11:</b>	Velocidades sugeridas para el flujo el vapor (m/s) .....	71
<b>Tabla 12:</b>	Datos calculados por el Software Pipe Flow .....	79
<b>Tabla 13:</b>	Características técnicas de la bomba y motor eléctrico para el efecto III .....	82
<b>Tabla 14:</b>	Características técnicas de la bomba a la salida del efecto I.....	84
<b>Tabla 15:</b>	Variación de áreas de transferencia con respecto a las temperaturas.....	85
<b>Tabla 16:</b>	Datos de relación de concentración (R. C) en 02 plantas diferentes.....	89

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad
$\dot{m}_{ag}$	Flujo másico de agua de cola	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
$\dot{m}_c$	Flujo másico de concentrado	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
$\dot{m}_v$	Flujo másico de vapor	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
$A_1 - A_3$	Área de transferencia	$[\text{m}^2]$
$B_A$	Área requerida de un perno	$[\text{V}]$
$C_L$	Constante por distribución de tubos	$[-]$
$C_{p_{ag}}$	Capacidad calorífica del agua de cola	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$
$C_{p_{c1}} - C_{p_{c3}}$	Capacidad calorífica del concentrado	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$
$D_s$	Diámetro interior de coraza	$[\text{m}]$
$M_1 - M_1$	Momentos por carga del viento	$[\text{kN} \cdot \text{m}]$
$N_{t1} - N_{t1}$	Número de tubos	$[\text{Und}]$
$P_w$	Presión del aire	$[\text{kPa}]$
$S_B$	Esfuerzo en el perno anclaje	$[\text{MPa}]$
$S_f$	Límite de fluencia mínimo especificado	$[\text{MPa}]$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	$[\text{°C}]$
$T_{ref}$	Temperatura de referencia	$[\text{°C}]$
$T_{va2}$	Temperatura de salida de vahos	$[\text{°C}]$
$T_{va}$	Temperatura de ingreso de vahos	$[\text{°C}]$
$T_1 - T_3$	Temperatura en los efectos	$[\text{°C}]$

$V_{va}$	Velocidad del vapor	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$X_c$	Grado de concentración	[%]
$f_c$	Esfuerzo de compresión	$\left[\frac{kN}{m^2}\right]$
$h_1 - h_3$	Entalpías de los efectos	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
$t_{cc}$	Espesor en costuras circunferenciales	[mm]
$t_{cl}$	Espesor por presión en costuras largas	[mm]
$V_{vapor}$	Volumen específico	$\left[\frac{m^3}{kg}\right]$
CTP	Constante en función de numero de pasos	[-]
DN	Diámetro nominal de la tubería	[m]
Do	Diámetro exterior de la tubería	[m]
F	Constante que depende del tipo de espejo	[-]
G	Diámetro medio del empaque o carcaza	[m]
Q	Calor transferido	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
R	Radio exterior	[m]
U	Coefficiente global de transferencia de calor	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
V	Velocidad lineal del fluido	$\left[\frac{m}{s}\right]$
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
d	Diámetro interno de la tubería	[m]
q	Caudal	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
t	Espesor de la pared	[mm]

**w**      Peso      [kg]

### Símbolos griegos

Símbolo	Descripción	Unidad
$\Delta T_1$	Caída de temperatura en un fluido a contraflujo	[°C]
$\Delta h$	Calor latente transferido	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
$\rho$	Densidad	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

### Subíndices

Símbolo	Descripción
prom	Promedio

### Siglas

Abreviatura	Significado
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
DAF	Sistema de Flotación de Aire Disuelto
EES	Engineering Equation Solver
HACCP	Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control
MINAN	Ministerio del Ambiente
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturers Association

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación se centra en el “Diseño, Modelamiento y Análisis Termodinámico de una Planta de Evaporación de Agua de Cola utilizando el Software Engineering Equation Solver”, abordando la temática con precisión y rigor. A nivel mundial, las plantas industriales enfrentan el reto constante de mejorar la eficiencia de sus procesos productivos y optimizar el uso de energía, un objetivo que solo puede alcanzarse mediante estudios y análisis detallados de su situación actual. En el caso de las plantas productoras de harina y aceite de pescado, el consumo energético es significativo, con aproximadamente un 95 % destinado al aporte térmico (combustible) y un 5 % a energía eléctrica, proporciones que varían según la capacidad de cada empresa (Honores & Casique et al., 2016).

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un modelo termodinámico y mecánico que cumpla rigurosamente con los estándares establecidos por las normativas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) y ASME (American Society of Mechanical Engineers). Este modelo estará específicamente diseñado para satisfacer las exigencias técnicas y operativas inherentes a dichas normativas, garantizando su aplicabilidad y precisión en entornos industriales.

El desarrollo de este trabajo adopta un enfoque multidisciplinario, integrando herramientas computacionales avanzadas para abordar los desafíos actuales en el diseño de plantas industriales. Gracias al uso del Software Engineering Equation Solver, se propone un modelo innovador que combina conceptos termodinámicos avanzados con un análisis mecánico detallado. Este enfoque no solo busca optimizar la eficiencia energética, sino también establecer un marco de referencia para futuras implementaciones en plantas de evaporación de agua de cola.

## CAPTÍTULO I.

### 1. MARCO METODOLÓGICO

#### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, en la industria pesquera se utilizan las plantas de evaporación de agua de cola, equipos diseñados para concentrar líquidos mediante la evaporización de partículas de agua aprovechando la energía residual térmica de otros procesos para la producción de harina. El agua de cola o aguas residuales es un subproducto producido durante la separación centrifuga del aceite de pescado, compuesto principalmente por agua, grasas y nutrientes. Adicionalmente, el producto final de la evaporización del agua de cola mejora la calidad de nutrientes presentes en la harina de pescado.

En la ciudad de Trujillo (Perú), una empresa ha ampliado su capacidad de producción, pero no cuenta con la capacidad adecuada para nueva demanda de la planta de harina. La infraestructura actual no es la adecuada para absorber la energía térmica adicional de la ampliación, obligando a evacuar el vapor de agua residual con sólidos en retención (VAHOS) al medio ambiente o tratarlos en una torre de lavado. El evacuar Vahos en su estado inicial al medio ambiente involucraría sanciones debido a que estos en su estado no cumplen con las regulaciones establecidas por el Ministerio del Ambiente (MINAN). Por otro lado, el tratamiento en una torre de lavado se vería reflejado en un gasto económico debido a la cantidad de agua de mar que se debe de bombear para su depuración. Además, esto sería un gran desperdicio de energía térmica y se generaría condensado sucio en los equipos aledaños a la zona, reduciendo su tiempo de vida útil.

Hasta el momento, no se ha logrado establecer una estrategia eficaz para optimizar el aprovechamiento de la energía térmica en plantas de evaporación que utilizan secadores rotadiscos y Rotatubos. Surge así la pregunta: ¿Usando el software EES (Engineering Equation Solver) para el análisis termodinámico y Autodesk Inventor junto con Ansys para el modelado isométrico, se puede diseñar una planta que maximice la eficiencia energética y cumpla con las restricciones mecánicas, considerando que estas herramientas avanzadas podrían ofrecer soluciones más eficientes que los enfoques tradicionales?.

## 1.2. ANTECEDENTES

En la industria pesquera, la evaporación de agua de cola es un proceso importante para la recuperación de subproductos. La evolución del diseño de plantas de evaporación de agua de cola en la industria pesquera ha sido influenciada por una variedad de factores, incluyendo la necesidad de reducir la contaminación ambiental, la optimización de la eficiencia energética, la gestión de residuos y la incorporación de tecnologías avanzadas.

Históricamente, en la industria pesquera, el agua de cola se consideraba un subproducto indeseado y se desechaba. No obstante, con el tiempo se descubrió que contenía nutrientes valiosos que podían aprovecharse como insumo para enriquecer el producto final en la producción de harina de pescado. El proceso de evaporación se convirtió en una herramienta importante para recuperar estos nutrientes (Colcha et al., 2022).

A raíz de este descubrimiento, la instalación de plantas de evaporación de agua de cola en la industria pesquera se ha vuelto cada vez más importante a medida que las empresas buscan reducir la cantidad de residuos que generan y mejorar su eficiencia energética. La tecnología ha avanzado significativamente en este sentido, y las plantas de evaporación modernas son mucho más eficientes y respetuosas con el medio ambiente que sus predecesoras.

Además de los beneficios ambientales, la instalación de plantas de evaporación de agua de cola en la industria pesquera también tiene un impacto positivo en la economía local. Las

empresas pueden vender los subproductos recuperados, lo que aumenta sus ingresos y ayuda a impulsar la economía local.

Para seguir impulsando mejoras tanto en el ámbito económico y medioambiental, es necesario continuar optimizando el diseño de las plantas de evaporación de agua de cola. En este sentido se han propuesto varias hipótesis. Una de ellas plantea la incorporación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para mejorar la eficiencia de los procesos. Otra hipótesis es la gestión eficiente de residuos, lo que implica la reutilización de subproductos y la minimización de los residuos generados (Vite et al., 2015).

Entre las mejoras de eficiencia, destaca especialmente la eficiencia energética, que es un factor clave en el diseño de plantas de evaporación de agua de cola. Se han propuesto varias ideas para mejorar la eficiencia energética, tales como el uso de tecnologías de recuperación de calor y la optimización del uso de energía renovable.

Asimismo, la gestión de residuos es otro factor crucial en el diseño de estas plantas. Las propuestas incluyen la reutilización de subproductos y la reducción al mínimo de los desechos generados, lo que contribuye tanto a la sostenibilidad del proceso como a la maximización de los recursos disponibles.

La mejora de la eficiencia energética y la gestión eficiente de residuos son dos de las principales hipótesis en el diseño de plantas de evaporación de agua de cola en la industria pesquera. Otra hipótesis es el uso de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para mejorar la eficiencia de los procesos.

En resumen, el diseño de plantas de evaporación de agua de cola en la industria pesquera ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, impulsado por la necesidad de reducir la contaminación ambiental, mejorar la eficiencia energética, gestionar residuos y adoptar tecnologías avanzadas.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo General

- Diseño, Modelamiento Y Análisis Termodinámico De Una Planta De Evaporación De Agua De Cola Con El Uso Del Software EES.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis del flujo de materia y energía en la planta evaporadora agua de cola.
- Desarrollar un modelamiento termodinámico utilizando el software EES.
- Diseñar 01 Planta De Evaporación De Agua De Cola, generando planos en el software Inventor 2025 y especificaciones técnicas.
- Analizar los esfuerzos utilizando el software Ansys 2025.
- Comparar los resultados obtenidos con estudios similares, tanto experimentales como numéricos, representándolos gráficamente y realizando un análisis comparativo.

### 1.4. JUSTIFICACIÓN

A medida que la industria pesquera busca formas de mejorar la eficiencia de sus fuentes de energía, es importante destacar la crítica importancia de la energía térmica. Esta fuente es fundamental para el tratamiento de los residuos líquidos generados en los procesos de producción de pescado y otros productos marinos. Por lo tanto, el diseño eficiente de las plantas de evaporación de agua de cola es crucial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la industria pesquera.

### 1.5. HIPÓTESIS

El diseño optimizado de una planta de evaporación de agua de cola será capaz de satisfacer de manera eficiente la demanda proyectada de concentrado para la producción de harina en la planta, garantizando la sostenibilidad operativa y maximizando la eficiencia energética del proceso.

## 1.6. ALCANCES

El alcance del proyecto incluirá:

- Optimizar el uso de la energía térmica residual generada por los equipos de secado.
- El diseño de la planta de evaporación permitirá reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Comparar resultados de estudios similares, tanto experimentales como numéricos y mostrarlos a través de gráficas y analizarlos

## 1.7. LIMITACIONES

A parte de la solución al problema propuesto, las limitaciones de esta investigación son las siguientes:

- Los materiales y equipos necesarios para la construcción, así como la operación de la planta de evaporación de agua de cola son muy elevados para realizar como módulo.
- La disponibilidad de datos es clave para un balance preciso de materia y energía. Su falta afecta la exactitud de los resultados y el diseño del sistema
- La capacidad de obtener mediciones precisas de la eficiencia energética actual del equipo térmico en estudio.
- La capacidad de interpretar y analizar los resultados de los estudios similares debido a las diferencias en los métodos y condiciones experimentales.
- La capacidad de modelar correctamente el comportamiento termodinámico de la planta de evaporación de agua de cola debido a la complejidad del sistema.

## CAPTÍTULO II.

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. PLANTAS DE EVAPORACIÓN

Los evaporadores se dividen en dos grupos: circulación natural y circulación forzada.

Los evaporadores de circulación natural se clasifican de la siguiente manera:

- Evaporador de tubos horizontales.
- Evaporador de tubos verticales con canasta.
- Evaporadores con chaqueta externa.

Los evaporadores de circulación forzada se utilizan para líquidos de mayor viscosidad, para sales, y soluciones que tienden a incrustarse. Estos se suelen dividir en:

- Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor vertical.
- Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo vertical.
- Evaporador de flujo de película descendente.
- Evaporadores de flujo de película ascendente.

En la Tabla 1 se presenta una comparación detallada de las ventajas, desventajas, aplicaciones y posibles inconvenientes asociados con los distintos tipos de evaporadores disponibles en el mercado. Esta información es clave para seleccionar el evaporador más adecuado según las necesidades específicas de cada proceso, considerando factores como la eficiencia energética, los costos de instalación y operación, la compatibilidad con diferentes tipos de líquidos y las demandas del entorno industrial en que se utilicen.

**Tabla 1:** Resumen de las pros y contras de los tipos de evaporadores

TIPO DE EVAPORADOR	PROS	CONTRAS	USOS RECOMENDADOS	LIMITACIONES
<b>CIRCULACION FORZADA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor área de transferencia</li> <li>- Mayor tiempo de vida útil.</li> <li>-Aprovechamiento de energía residual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo alto</li> <li>- Perdida de energía para la bomba de circulación.</li> <li>- Tiempo de estancia en el equipo alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Productos cristalinos.</li> <li>- Soluciones corrosivas.</li> <li>- Soluciones viscosas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las entradas de los tubos por acumulaciones de sales.</li> <li>- Circulación deficiente, provocada por pérdidas de carga superiores a las anticipadas.</li> <li>- Corrosión y desgaste</li> </ul>
<b>VERTICALES DE TUBO CORTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espacio corto de terreno y peso ideal.</li> <li>- Buena transferencia de calor con líquidos no viscosos.</li> <li>-Espacio reducido de fabricación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja transferencia de calor con diferencias bajas de temperaturas.</li> <li>- Mucho espacio y peso alto.</li> <li>- Retención relativamente alta.</li> <li>- No optimo con líquidos viscosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquidos limpios.</li> <li>- Productos cristalinos.</li> <li>- Líquidos no corrosivos, puesto por el tamaño del cuerpo costoso.</li> <li>- Soluciones con formación ligera de escamas, que requieren una limpieza mecánica.</li> </ul>	N.A
<b>VERTICALES DE TUBO LARGO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo y retención.</li> <li>- Gran área de transmisión en un solo cuerpo.</li> <li>- Requiere poco espacio de instalación.</li> <li>- Óptimos coeficientes de transferencia de calor con diferencias de temperaturas moderadas (Película ascendente)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere mucho espacio.</li> <li>- No recomendado para liq. que forman deposiciones de sales o escamas.</li> <li>- En la versión de película descendente requiere recirculación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Con líquidos limpios.</li> <li>- Con líquidos espumosos.</li> <li>- Con soluciones corrosivas.</li> <li>- Con grandes cargas de evaporación.</li> <li>- Con diferencias elevadas de temperatura (Ascendente) Con diferencias bajas de temperaturas (descendentes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad de las unidades de película ascendente a los cambios de las condiciones operacionales.</li> <li>- Mala distribución del material de alimentación a las unidades de película descendente.</li> <li>- Dificultad en el proceso de montaje y desmontaje de los diferentes cuerpos.</li> </ul>
<b>TUBO HORIZONTAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espacio superior muy bajo.</li> <li>- Buenos coeficientes de transferencia de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No recomendados para los líquidos que dejan deposiciones de sales.</li> <li>- No adecuado para los liq. que forman escamas.</li> <li>- Altos costos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluidos en contraflujo</li> <li>- Capacidad reducida</li> <li>- Líquidos que no generen caliche en los tubos.</li> </ul>	N.A

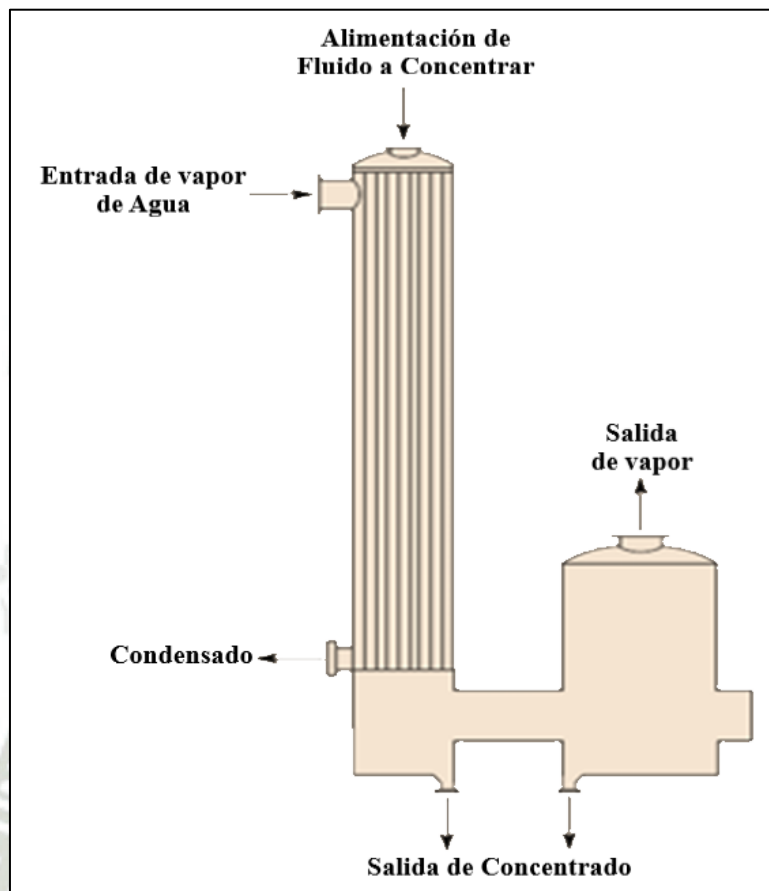
Nota: Adaptado de Basantes et al. (2014)

### a) Planta evaporadora del tipo flujo de película descendente

El evaporador de película descendente hace uso del vapor sobrecalentado proporcionado por las calderas como surtidor de energía, la mayoría de veces el vapor sobrecalentado es de baja presión, entre los 2 y 3 bar absoluto, y el fluido se evapora dentro de los efectos está en 0,05 bar absolutas de vacío moderado. Con la generación de la presión de vacío se logra disminuir la temperatura de evaporación del líquido incrementando la diferencia de temperatura entre el vapor sobrecalentado y el líquido de vaporización y, por tanto, aumenta la velocidad de transferencia de calor en el evaporado. El proceso de operación de la planta evaporadora consta en que el vapor sobrecalentado ingrese en el primer efecto a la cavidad existente entre el casco y los tubos realizando de esta manera la transferencia de calor; el agua evaporada en el primer efecto se convierte en vapor residual que alimentara al segundo efecto, y el vapor residual del segundo efecto alimentara al tercer efecto. El vapor residual generado en el tercer efecto es tratado en el condensador barométrico, donde además se produce la presión de vacío para las 03 etapas de vaporización (Vite et al., 2015).

Como se puede observar en la figura 1, en estos evaporadores la dotación del flujo del fluido caliente es ingresada por la parte más alta del equipo, en la generalmente se eleva a la temperatura de ebullición del primer efecto, mediante equipos calentadores adecuados al producto. Se genera un suministro homogéneo del producto dentro de los tubos en la cavidad más alta del evaporador, generando una película de flujo descendente de características uniformes en los tubos. Este punto es clave, ya que una falta de humedad de los tubos trae posibles faltas en el proceso de evaporación en algunos sitios haciendo que el proceso no se fomenta correctamente, lo cual lleva a bajas eficiencias de evaporación y contaminación con la adherencia de partículas en los tubos. En el interior de los tubos se genera la ebullición parcial (Tarazona & Portilla et al., 2016).

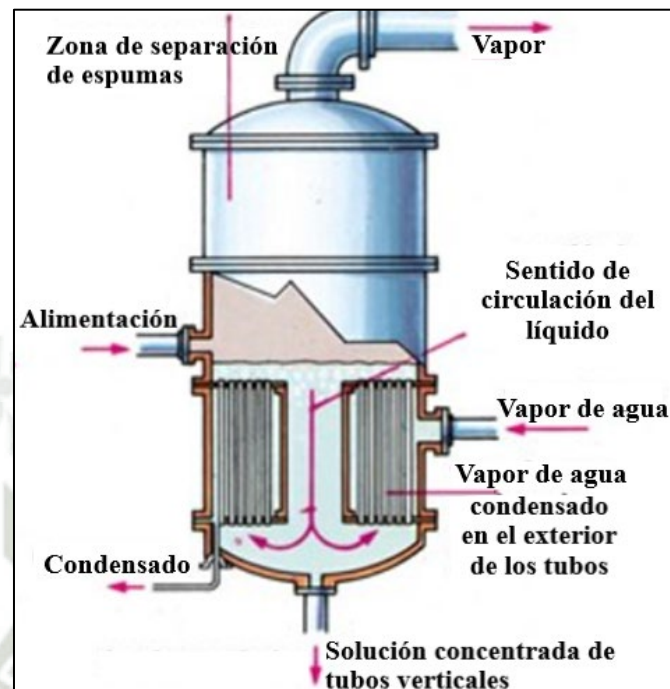
**Figura 1:** *Unidad de tubos largos verticales de película descendente*



*Nota: Recuperado de Tarazona & Portilla et al. (2016)*

### **b) Evaporadores de Calandria**

Este tipo de evaporadores se compone de un haz de tubos verticales y cortos, generalmente de no más de 2 metros de altura, ubicados entre dos espejos que se replican en las bridas del cuerpo del evaporador. El vapor brindado por las calderas circula por el exterior de los tubos dentro de la calandria, donde hay un amplio paso circular en el centro del haz de tubos que permite que el líquido más frío recircule hacia la parte inferior. Los tubos tienen un diámetro exterior de 3 pulgadas para minimizar la caída de presión y facilitar una rápida recirculación. También se les conoce como evaporadores estándar debido a su uso frecuente. Además, como la mayoría de las incrustaciones se producen dentro de los tubos, estos evaporadores son adecuados para operaciones más exigentes en comparación con los evaporadores de tubos horizontales (Vite et al., 2015).

**Figura 2:** *Evaporadores de Calandria*

*Nota: Recuperado de Vite et al. (2015)*

### c) Evaporador de circulación forzada

Los evaporadores de circulación forzada pueden no ser tan rentables, pero son esenciales cuando los productos a evaporar presentan propiedades que provocan incrustaciones, altas viscosidades, precipitaciones, salmueras, cristalizaciones o ciertas propiedades térmicas que impiden un flujo natural. En estos equipos, el producto se calienta mediante un intercambiador de calor (que puede ser horizontal o vertical), y luego se dirige a un separador donde la evaporación ocurre debido a la expansión de la presión existente en el interior, lo que da resultado una evaporación flash y, por consiguiente, un enfriamiento del producto. Es crucial considerar la velocidad de circulación del producto dentro de los tubos, ya que esto varía según la viscosidad o tipo de producto (Tarazona & Portilla et al., 2016).

## 2.2. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA DE PESCADO

### 2.2.1. Esquema de Flujo del Proceso de producción de Harina de Pescado

La figura 3 nos muestra el proceso que recorre la materia prima desde que es descargada de las diferentes embarcaciones hasta su despacho como harina y aceite de pescado. Para el

desarrollo de esta tesis nos centraremos en área de centrifugado, secado y principalmente en zona de la planta de evaporación. Continuando con el proceso de producción de harina de pescado, el proceso se divide en:

- Recepción de materia.
- Almacenamiento de materia prima en poza.
- Cocinado de materia prima.
- Drenado de caldo de pre-strainers.
- Prensado y formación de keke de prensa.
- Separación sólidos-líquido (Centrifugado).
- Molienda.
- Secado.
- Evaporación
- Purificado.
- Enfriamiento.
- Molienda.
- Dosificación de antioxidante.
- Almacenamiento.

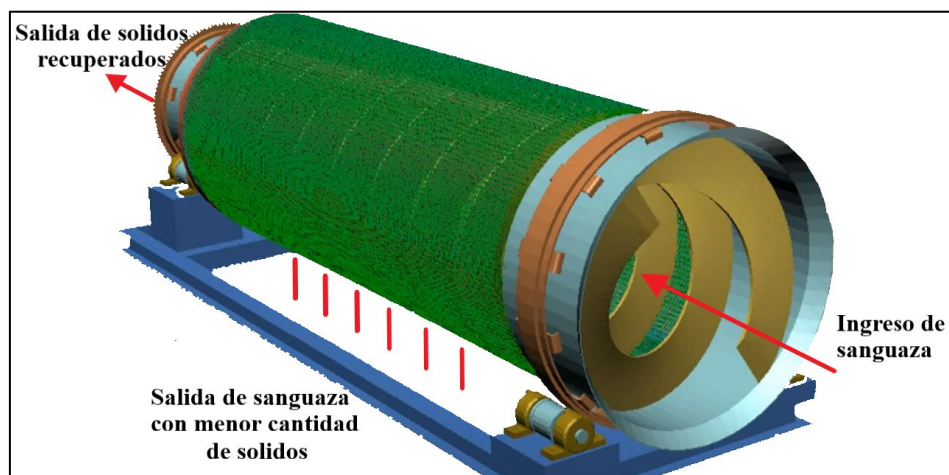


### **2.2.2. Descarga, Recepción y Pesaje De Materia Prima**

El objetivo de transportar el pescado que es proveído por embarcaciones y terceras desde la bodega de la embarcación hasta la tolva de pesaje en planta, para ellos la materia prima es transportada desde la estación de bombeo ubicada en el mar (CHATA) por un sistema que consiste en el uso de bombas de vacío, tanques de traspaso, válvulas mariposa automáticas y compresores. El pescado es transportado a través de tuberías submarinas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), teniendo en cuenta una relación de agua/pescado. La recepción en plante es mediante desagües, estos pueden ser estáticos o vibratorios. Luego de la recepción del pescado a través de los desagües, estos son transportados por medio de transportadores de mallas a las Pre-tolvas para ser pesados en las tolvas de pesaje. Una vez pesado el pescado, estos son distribuidos a las pozas. La sanguaza o agua con sangre que es recolectado de los desagües, transportador de mallas y pozas son descargados en un pozo para posteriormente ser bombeados al sistema de tratamiento del Programa de Adecuación de Manejo Ambiental (PAMA).

### **2.2.3. Recuperación Primaria**

La sanguaza que se encuentra almacenada en una poza es bombeada hacia una serie de Cilindros Giratorios con Sistemas de Filtración de Partículas (TROMMEL), estos equipos se encuentran diseñados para recuperar la mayor cantidad de sólidos (viseras, escamas, etc.) mayor a 1 mm de pescado que aún se encuentran en la sanguaza. Los sólidos recuperados son transportados a través de una serie de tornillos helicoidales hacia una cinta transportadora elevadora de cangilones, que se encuentra antes de ingresar a la cocina a vapor. En cuanto a la parte líquida saliente de los Trommels, este se deja caer por gravedad hacia los equipos de recuperación secundaria. En la figura 4 se puede observar un trommel y su sistema de filtración, que está conformado por mallas.

**Figura 4:** *Trommel Rotatorio*

*Nota: Recuperado de Westpro et al. (2023)*

#### 2.2.4. Recuperación secundaria

En la recuperación secundaria existen tres etapas. En la primera etapa de recuperación, la parte líquida enviada desde los Trommels es almacenada en una trampa de grasa que por el principio de densidades hace que la grasa emerja en la superficie y mediante paletas (Skimmers) es extraído de la trampa por rebose. En la segunda etapa, el líquido pobre en grasa de la primera etapa es enviado por gravedad al Sistema de Flotación de Aire Disuelto (DAF) que por medio de la inyección de micro burbujas; hace que la grasa presente en el líquido sea atrapada por estas y emerjan a la superficie, siendo estas extraídas por rebose y con ayuda de Skimmers.

Finalmente, en la tercera etapa se utilizarán productos químicos tales como floculante y coagulante, para generar lodos. Estos lodos recuperados en este proceso son bombeados a la poza de sanguaza generando una recirculación de estos; por otro lado, el agua clarificada de esta tercera etapa es enviada por gravedad al pozo emisor luego de cumplir con las Partes por Millón (PPM) correspondientes a las normas ambientales para ser posteriormente enviado al mar. Cabe mencionar que la grasa recuperada de la etapa 1 y 2, son bombeados a intercambiadores de calor de casco para ser calentados a una temperatura entre los 60°C y 70°C y de esta manera ser enviados al proceso de separación PAMA.

### 2.2.5. Cocción

La finalidad de esta etapa son 3: el liberar lípidos, coagular proteínas, reducir la humedad de la materia prima y eliminar cualquier microbio presente en el pescado. La cocción del pescado se realiza por medio de cocedores horizontales indirectos alimentados por vapor sobrecalentado proveniente de las calderas, estos deben estar a una temperatura promedio entre 80 y 100°C y con un tiempo de aproximadamente 15 – 20 minutos; esto es variable dependiendo de la cantidad de materia que ingresa y de la humedad relativa presente en el pescado.

La transferencia de calor a la materia prima se logra mediante vapor vivo sobrecalentado de calderas que pasan en contracorriente por el interior del eje del tornillo transportador, en algunas operaciones se usa el condensado de los secadores a vapor las cuales fluyen por las chaquetas del cocedor. La cocción constituye el primer punto crítico de control dentro del Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP), siendo el límite crítico 75 °C a la salida de las cocinas. Una cocción adecuada se logra controlando la temperatura y el tiempo de residencia en el equipo. Durante la operación de cocción se controla: Revoluciones por minuto (RPM) de las cocinas (4-6 RPM promedio), presión de ingreso de vapor al tornillo helicoidal (2.5 - 6 bar), temperatura de entrada, temperatura de salida del condensado y temperatura de salida de la materia prima cocida. En la figura 5 se puede observar una cocina estática indirecta (Colcha et al., 2022).

**Figura 5:** *Cocina Estática Indirecta*



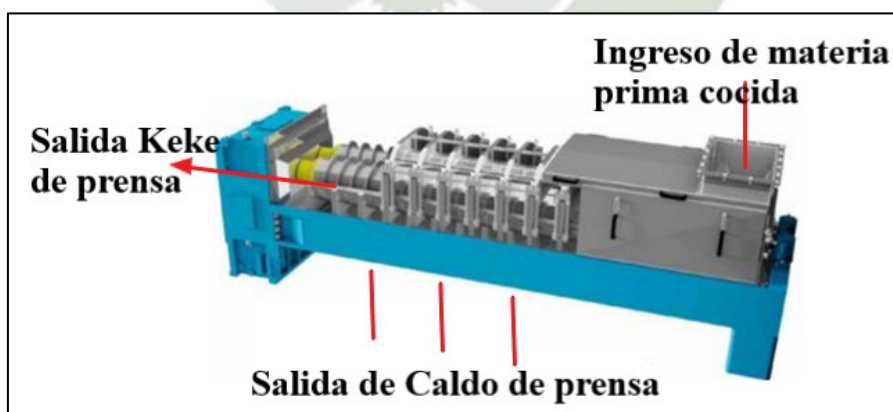
*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

### 2.2.6. Prensado

En la etapa de prensado existen 2 etapas; en la primera etapa el pescado cocido pasa por un filtro (Pre-Strainer), donde se eliminan la mayor cantidad de líquidos presentes en el pescado. El Pre-Strainer es un equipo que en su interior cuentan con mallas cilíndricas perforadas, el cual dentro de las mallas cilíndricas se encuentran tornillos helicoidales el cual transporta la materia prima de un extremo a otro.

En la etapa 2, el pescado enviado de los Pre-strainers es ingresado a una prensa de dos 2 tornillos. Como se puede observar en la figura 6, los tornillos se encuentran desfasados dejando un pequeño gap entre los discos de los tornillos, para así extraer la mayor cantidad líquidos (caldo de prensas) y una humedad de entre 45% -50% por acción de presión mecánica o estrujé. El caldo de prensas de ambas etapas de prensado se es bombeado a tanques metálicos de almacenamiento para posteriormente ser tratados en la etapa de separación y generación del aceite de pescado. En cuanto a la parte solida o keke de prensa se en enviados a través de tornillos helicoidales a la etapa de Secado.

**Figura 6:** Prensa de doble tornillo



*Nota: Recuperado de Mesones et al. (2022)*

### 2.2.7. Tratamiento de caldos y generación de aceite de Pescado

En esta parte del proceso se tiene 3 etapas fundamentales las cuales son: Separación por equipos Dicanter, calentamiento de licor de separadora y Centrifugas.

### a) Separación por equipos Dicanter

En esta etapa del proceso se trata de recuperar la mayor cantidad de partículas sólidas suspendidas en el caldo de prensas para esto se utilizan las decantadoras (Dicanter). Como se muestra en la figura 7, estos equipos tienen la forma de un tambor y están equipados con un tornillo sinfin el cual gira a altas velocidades de entre 3000 – 3500 RPM, debido a esto la fuerza centrífuga vertical que genera es que se puede dar la separación de la parte líquida y sólida del caldo de prensa. Los sólidos recuperados de la Dicanter son enviados al proceso de secado mediante transportadores helicoidales, mientras que la parte líquida o licor de separadora es enviado mediante bombas a la etapa de calentamiento.

**Figura 7:** *Decantador centrífugo*



*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

### b) Calentamiento de licor de separadora

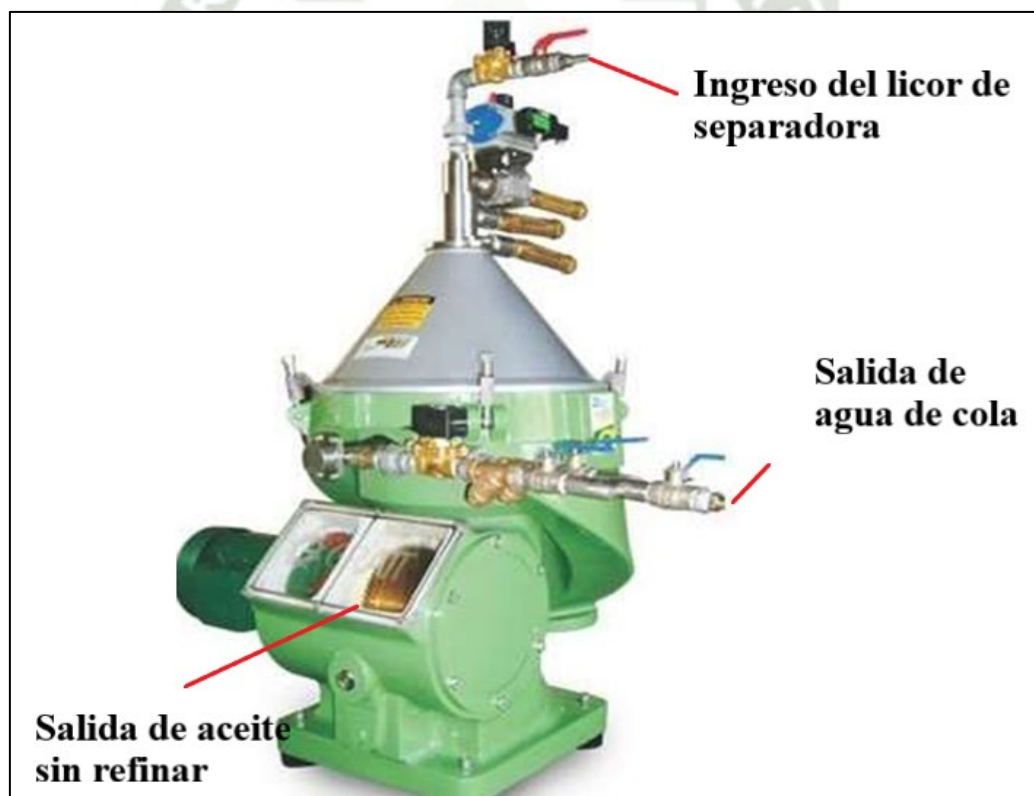
Para este punto del proceso, la parte líquida (Licor de Separadora) expulsada de la Dicanter serán calentados con la finalidad de reducir la viscosidad del licor, siendo esto esencial para la correcta separación de sólidos insolubles, agua de cola y aceite de pescado sin refinar. Para lograr esto, primero se debe calentar el Licor de Separadora en intercambiadores de casco

y tubo, donde el calor aplicado proviene del vapor Flash recuperado de las cocinas. Esto elevará la temperatura del licor entre los 90-95 °C.

### c) Centrifugas

Una vez el Licor de Separadora haya alcanzado la temperatura adecuada se es enviado a las centrifugas; que son equipos que generan 3 fases, tales como sólidos insolubles, agua de cola y aceite de pescado sin refinar. Como se detalla en la figura 8, las centrifugas poseen un cuerpo en forma de tambor vertical que en su interior poseen platos en forma de sombreros chinos uno encima de otros; estos componentes giran a altas velocidades entre 4500 – 5000 RPM producen la fuerza centrífuga necesaria para separar las 3 fases del licor de separadora.

**Figura 8:** Clarificador comercial de aceite de pescado o centrifuga



*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

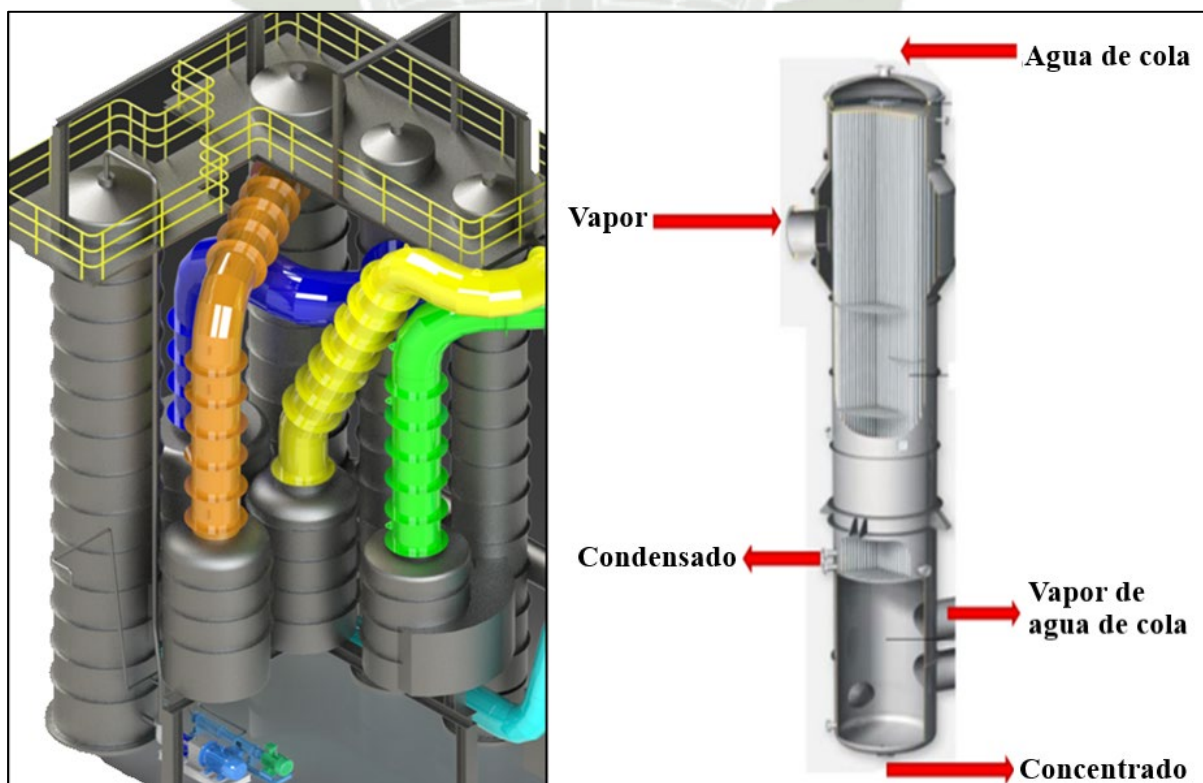
### 2.2.8. Operación de Evaporación

El agua de cola proveniente de las centrifugas contiene aproximadamente entre 7-10% de sólidos ricos en proteínas necesarios para una harina Premium. En esta etapa de evaporación

el agua de cola es ingresado a una planta de evaporación que su principio de funcionamiento es la de un intercambiador de calor completamente herméticos al ambiente ya que se utilizan bombas de vacío, además de que su fuente de energía térmica primaria es los vahos provenientes de los equipos de secado.

Para conseguir una harina de calidad, se insta a hacer uso de los solubles concentrados provenientes de la misma materia prima procesada, los solubles necesarios son obtenidos gracias a las plantas de evaporación. En el proceso de evaporación, es indispensable controlar el exceso de grasas en el agua de cola, ya que esto disminuye la calidad y proteínas de la harina de pescado. Adicionalmente, el exceso de grasas en el agua de cola dificulta la transferencia de calor entre el fluido caliente que pasa a través del casco del evaporador y los tubos, esto debido a que se forman capas de grasa en la parte interna de los tubos, afectando la eficiencia del evaporador y dificultando su limpieza. La figura 9 ilustra una planta de evaporación de 03 etapas (Neira et al., 2015).

**Figura 9:** *Planta de Evaporación de Agua de Cola*



### 2.2.9. Operación de Secado

En el proceso de secado se tiene como finalidad el evaporar la mayor cantidad de partículas de agua presentes en la torta de prensa, la torta de la separadora (sólidos que salieron de la Dicanter) y el concentrado que salió la planta de evaporación, todos ellos integrados y homogenizados previamente. La reducción en su porcentaje humedad con este proceso es para evitar el oxidamiento que puedan degradar al producto; sin embargo, el proceso de secado no debe llevarse a niveles que puedan destruir los elementos nutricionales. Existen dos tipos de secado, el secado directo y el secado indirecto. El secado directo se realiza a fuego directo, en el cual la energía para la evaporación es provista a la superficie del producto, respetando una cierta separación entre el flujo del producto y el flujo del fluido caliente. Realizar un estricto control de la combustión, para evitar que los productos de combustión puedan contaminar la harina (Neira et al., 2015).

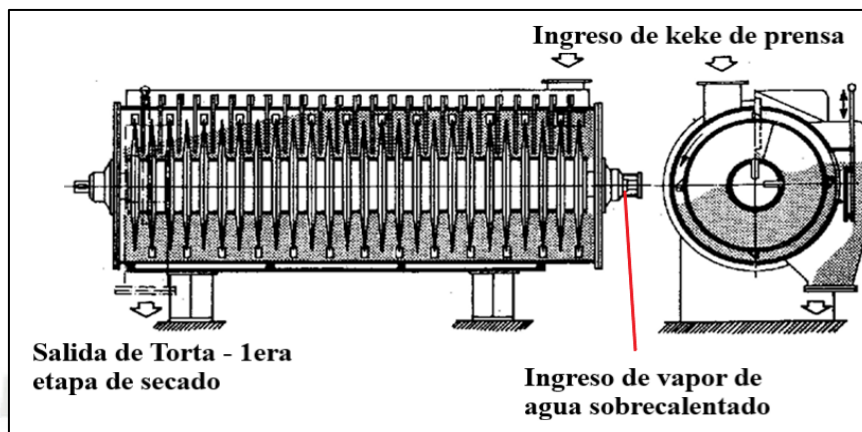
#### a) Secadores Rota discos

El tiempo de residencia de la torta en el secador está supeditado a la capacidad carga y a la velocidad de secado. La figura 10 ilustra el comportamiento de un secador rota discos, en donde la transmisión de calor es por conducción efectuándose cuando la harina tiene interacción con la chaqueta y los discos del rotor en un plazo establecido, con la cual se asegura la composición proteica, degradación lipídica y formación de una sustancia viscosa (Mollerosina), logrando un mayor porcentaje de proteínas digeribles (Neira et al., 2015).

El secado es del tipo indirecto y por transmisión de calor conductivo, por lo que requiere tiempos prolongados de estancia (30 minutos) de la torta en el equipo a fin de lograr porcentajes de humedad en el rango 20-25 %. Estos secadores trabajan a una presión máxima de vapor de ingreso de 85 psi y temperatura de salida de 75 – 95 °C. El secado a vapor es el segundo punto crítico de control siendo el límite crítico una temperatura  $> 70$  °C en la materia a la salida del secador. Con estas condiciones de funcionamiento se asegura la oxidación proteica,

previniendo la oxidación de lípidos y la formación de resinas logrando un mayor porcentaje de proteínas asimilables (Colcha et al., 2022).

**Figura 10:** *Secador Rota Discos*

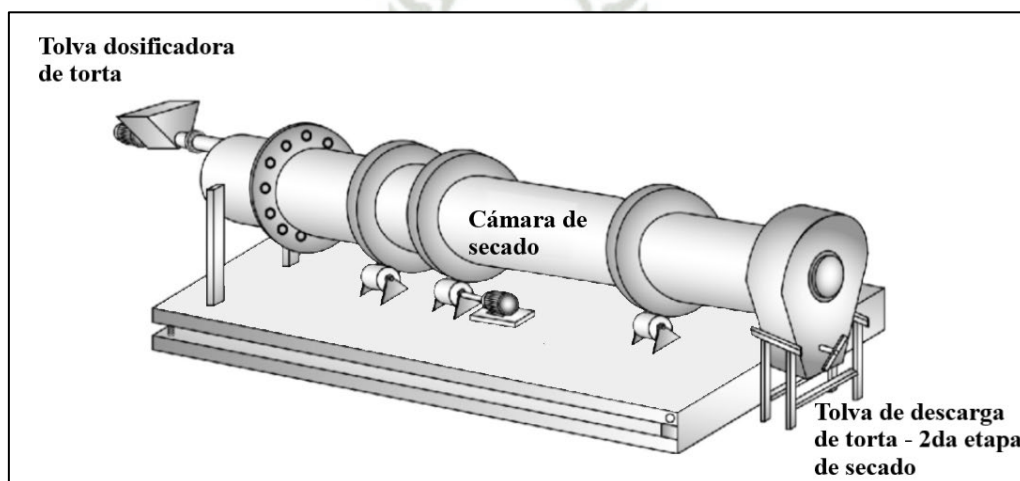


*Nota: Recuperado de Colcha et al. (2022)*

### b) Secador Rota Tubo

En la figura 11 se puede observar un secador rotatubos, estos equipos poseen una alta capacidad de evaporación y calidad del producto. Es un secador indirecto construido con un tambor rotativo con palas de elevación internas que distribuyen el producto y una superficie de calentamiento que esté compuesto por tubos en paralelos al rotor y calentados por vapor. El producto se transporta a través del secador por gravedad, se mezcla y desliza hacia la salida por el movimiento giratorio de la secadora (Sandoval et al., 2017).

**Figura 11:** *Secador Rotatubos*



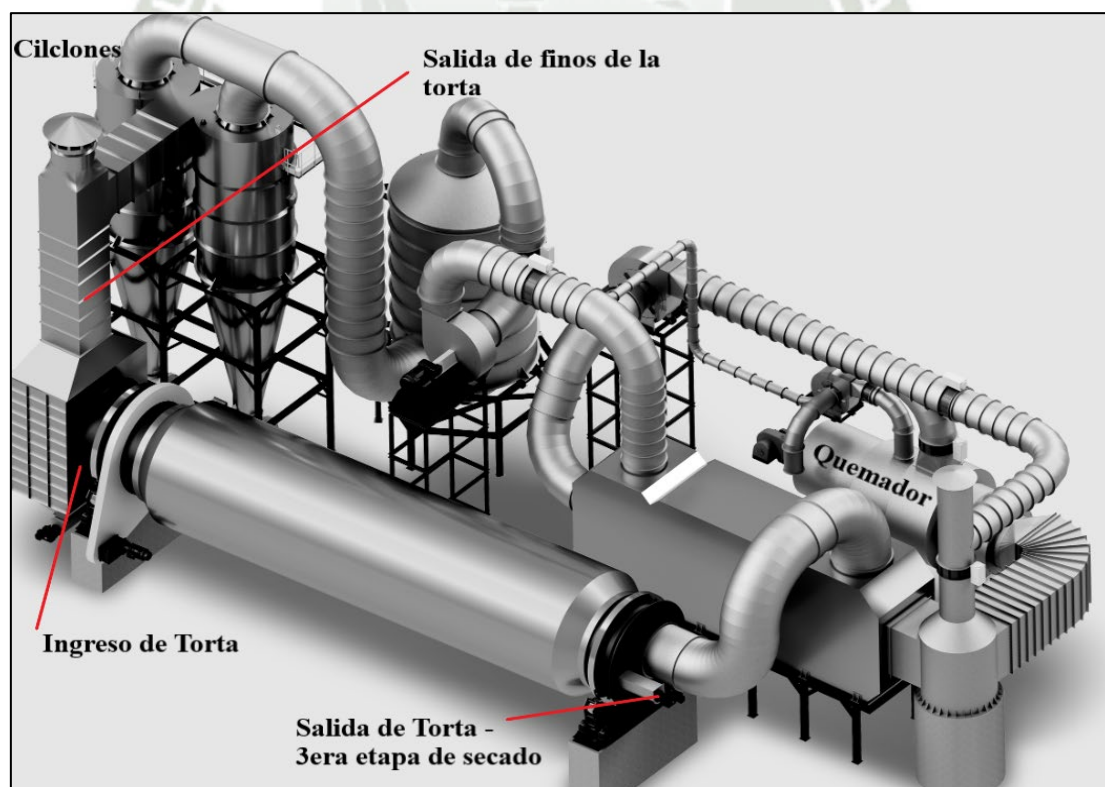
*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

### c) Secador de Aire Caliente

En la figura 12 se puede observar un secador de Aire Caliente, este equipo realiza la segunda etapa del secado de la harina. Consiste en exponer la harina en grumos (SCRAP) a una corriente de aire caliente, para que progresivamente vaya transfiriendo calor al contenido de agua, vaporizándolo y al mismo tiempo extrayéndolo. Esta corriente de aire se establece entre el ventilador que absorben aire del medio ambiente, atravesando por un intercambiador de tubos (lugar donde se produce la transferencia de calor) y el ventilador de extracción o exhaustor. Además de ir progresivamente vaporizando el agua y sacando fuera del secador, va trasladando el Scrap desmenuzado dentro del secador hasta descargarlo (Neira et al., 2015).

El tiempo de residencia del material a secar es de aproximadamente 15 minutos obteniéndose un scrap con una humedad de 5 – 6,5%.

**Figura 12:** *Secador de aire caliente*



*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

#### **d) Secador Directos**

Llamados también a fuego directo, utilizan combustible para su proceso de secado, el cual es directamente aplicado a la torta integral en la segunda etapa del secado, este tipo de secadores están siendo modificados y/o reemplazados, ya que el combustible combustionado, tiene contacto directo con el alimento, lo que hace que este sea de menor calidad y sea propenso a superar algunos límites sanitarios para la harina de pescado (Neira et al., 2015).

#### **2.2.10. Enfriamiento**

El Scrap resultante del secador de aire alimentos a los enfriadores que trabajan con aire a velocidades altas a contracorriente al fluido caliente a enfriar, donde el tiempo de estancia es de 12 minutos a más aproximadamente, luego a la salida alcanza una temperatura estabilizada (31-36 °C). Cada enfriador cuenta con un sistema de filtrado tipo magas, para evitar la fuga de finos orgánicos al ambiente. El producto final de los enfriadores será enviado hacia el sistema de molienda (Rodríguez et al., 2012).

Como se puede observar en la figura 13, el enfriador cuenta con un exhaustor (cuerpo cilíndrico de color azul), el cual se encarga de inyectar aire a altas velocidades y a una temperatura menor de 36 °C dentro del cuerpo principal del enfriador. El enfriador tiene por finalidad reducir bruscamente la temperatura del producto, a fin de estabilizar una serie de reacciones químicas, físico - químicos y biológicos que normalmente tiene lugar. Es necesario tomar en cuenta que el proceso de enfriamiento tiene lugar una deshidratación adicional, por lo tanto, se requiere controlar la humedad del sólido especialmente por el riesgo que puede significar en daño térmico en harinas muy secas (Tarazona & Portilla et al., 2016).

#### **2.2.11. Molienda**

Una vez que la torta de harina ha reducido considerablemente su humedad relativa con en el secador de fuego directo, esta se transporta por medio de transportadores helicoidales hacia el molino de martillos, diseñado con la finalidad de asegurar la reducción de la torta de

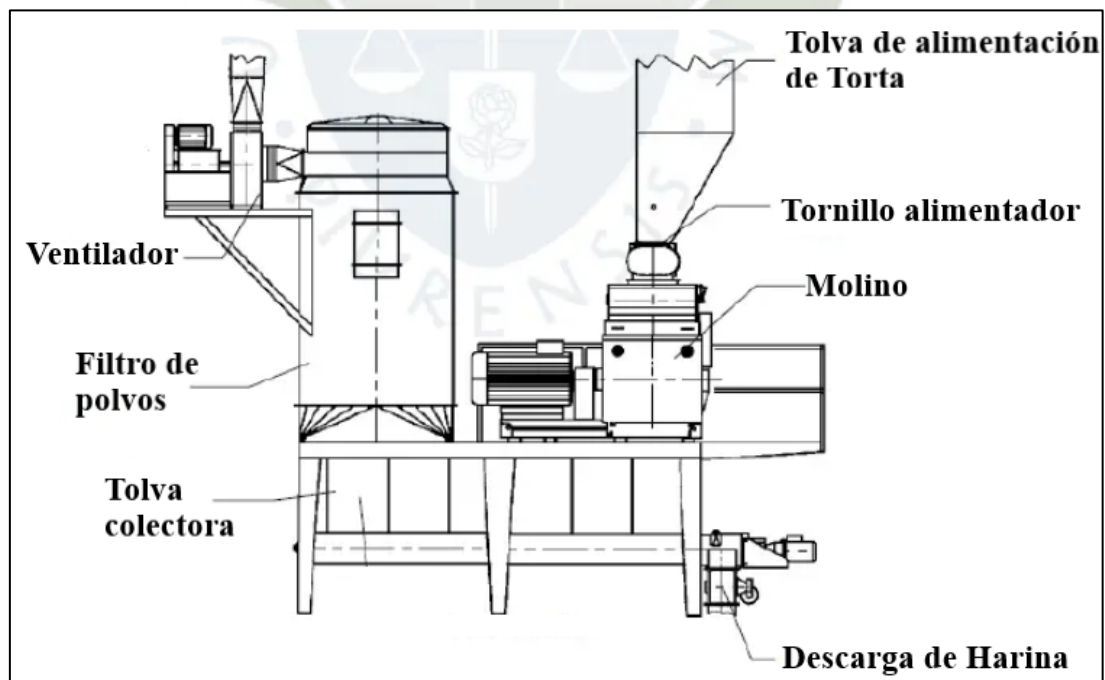
harina a pequeños restos óseos provenientes de diversas materias primas utilizadas en el proceso, hasta alcanzar el requerimiento granular dado por los compradores. El objetivo es tener una harina de alta calidad (Vite et al., 2015).

La molienda de la harina es de vital importancia, porque una buena apariencia granular incidirá favorablemente en la aceptación del producto en el mercado. La molienda es una operación que tiene dos finalidades inmediatas:

- Lograr productos que cumplan con las condiciones y especificaciones en cuanto a los tamaños máximos y mínimos.
- Fabricar materiales que satisfagan ciertos requisitos relacionados con la superficie específica.

De manera general se puede decir que una harina con muchas partículas grandes, puede ser peligrosa para los piensos (alimentos) de las aves o por el contrario mucho polvo origina pérdida de material y presentar tendencia a formar grumos, solidificándose con la presión del peso de las pilas, en el almacenamiento (Neira et al., 2015).

**Figura 13:** *Molino tipo martillo*



*Nota: Recuperado de Sandoval et al. (2017)*

### 2.2.12. Ensaque y Adición de Antioxidante

Para la dosificación del antioxidante en la harina de pescado, esta se introduce en un tolvín que posee dos transportadores helicoidales paralelos y en la parte superior del tolvín se encuentran las boquillas dosificadoras de antioxidante, los tornillos tienen la finalidad de mezclar homogéneamente el antioxidante y la harina de pescado. Una vez finalizado el homogenizado, el producto final es transportado al equipo de ensacado para el empaquetado y sellado de los sacos de harina (50 kg +/- 0.5 kg). Antes de llegar a la etapa de codificación, los sacos pasan por una balanza dinámica con la finalidad de corroborar que el peso sea el adecuado. Finalmente, los sacos son codificados según el lote de producción y transportados al almacén (Colcha et al., 2022).

### 2.2.13. Almacenamiento

La harina de pescado debe almacenarse en lugares limpios y secos, alejados de focos contaminantes. Se establece como una buena práctica un periodo de consumo preferente de nueve meses a partir de la fecha de fabricación, tanto para la harina envasada en bolsas como para la harina en pellets a granel. En campos de almacenamiento que no se encuentren enlosados, antes del armado de las rumas se debe realizar un tratamiento al suelo a base de cal y sobre ella colocar esteras, evitando el contacto con el suelo. Los silos han encontrado uso en la industria de la harina de pescado en los últimos años, por ofrecer protección a la harina durante almacenamiento. La harina de pescado se asegura contra la humedad en los almacenes para harina de pescado ensacada. Los almacenes deben tener techos por la condensación y el goteo en la noche; además para evitar que las afectaciones climáticas, lluvias, cambios de temperatura y de humedad afecten a la harina.

## CAPTÍTULO III.

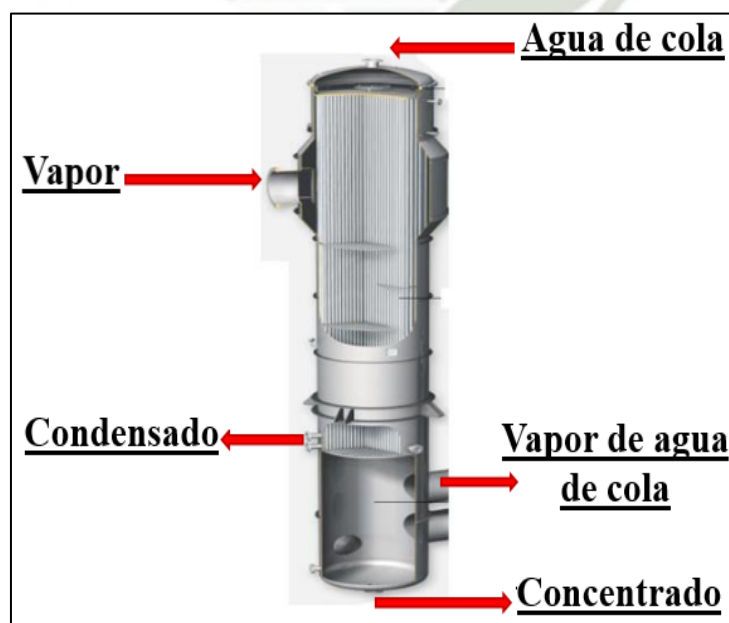
### 3. METODOS Y ECUACIONES DE DISEÑO

#### 3.1. ENFOQUE Y DISEÑO

A continuación, se muestra el Evaporador de Película Descendente, en donde se identifican flujos de entrada y salida.

Para determinar el número de efectos en la planta de estudio, es fundamental realizar un balance de materia y energía. Este proceso permite comprender cómo fluyen los recursos a través del sistema y cómo se intercambia la energía dentro de la planta. Una vez que se tiene un entendimiento claro de los flujos de materia y energía en la planta, se puede proceder a seleccionar la configuración de efectos más adecuada. Esto implica determinar el número óptimo de efectos que maximicen la eficiencia del proceso y minimicen los costos operativos.

**Figura 14:** *Datos de entrada del Evaporador de película descendente*



*Nota: Recuperado de Colcha et al. (2017)*

### 3.2. USO DEL SOFTWARE EES

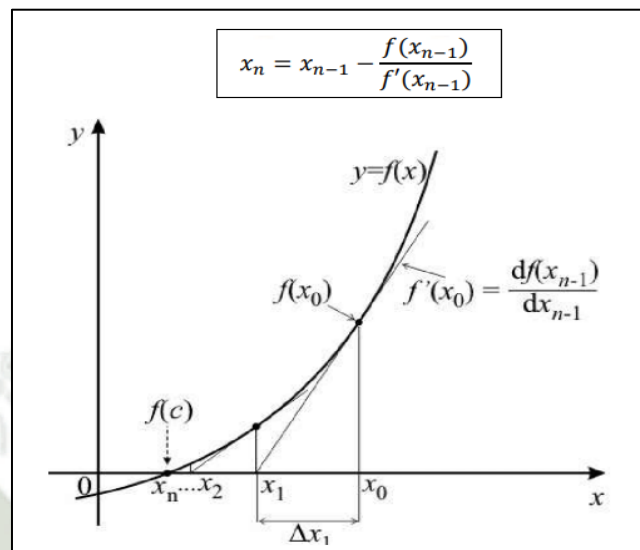
Engineering Equation Solver (EES) es un software especializado utilizado en el campo de la ingeniería para resolver una variedad de problemas relacionados con ecuaciones algebraicas y diferenciales. El software utiliza métodos numéricos avanzados, como el método de Newton-Raphson para la resolución de ecuaciones no lineales, así como técnicas de optimización y análisis paramétrico para evaluar diversas condiciones de operación (Yapo et al., 2023).

La simulación de la planta de evaporación en el EES fue posible debido a las diferentes facilidades que ofrece, las cuales son las siguientes:

- EES está diseñado para simplificar el análisis termodinámico y la simulación de sistemas energéticos, permitiendo a los usuarios modelar sistemas complejos mediante ecuaciones que describen comportamientos físicos y térmicos.
- Una de sus facilidades distintivas es su capacidad para integrar bases de datos extensas de propiedades termodinámicas de fluidos, lo que permite realizar cálculos precisos de propiedades como entalpía, entropía y presión en función de la temperatura y otros parámetros.
- El software nos ofrece la el modo diagrama, el cual nos permite programar, así como hacer las simulaciones de los sistemas termodinámicos más interactivos y dinámicos con los usuarios.

#### 3.2.1. Método de Newton Raphson

Como se mencionó líneas arriba el software EES realiza sus soluciones mediante el método de Newton-Raphson o Método de Newton, el cual se basa en un algoritmo de aproximación progresiva para resolver sistemas de ecuaciones numéricas. El método consiste en asumir un valor inicial para las variables y refinarlo iterativamente usando la fórmula que se muestra en la figura 15 (Villalba et al., 2019).

**Figura 15:** Ecuación e interpretación geométrica del método de Newton Raphson

Nota: Adaptado de Villalba et al. (2019)

Adicionalmente en la figura 15 se puede observar una representación gráfica bastante simple del método Newton-Raphson. En donde  $f(x)$  es la función a resolver y  $f'(x)$  es su derivada. EES automatiza este procedimiento, calculando internamente las derivadas y manejando las iteraciones hasta que las soluciones convergen dentro de un margen de tolerancia establecido, garantizando precisión en los resultados de sistemas complejos de ecuaciones (Villalba et al., 2019).

### 3.3. BALANCE DE MATERIA

Para realizar un balance de materia se tomaron valores brindados por el Ministerio De Energía y minas, estos valores son porcentajes de humedad, grasas y solidos presentes en los diferentes procesos de la producción de harina de pescado. Con los resultados del balance de materia se podrá tener la cantidad de agua de cola (flujo masico de entrada) que ingresará a la planta de evaporación. La planta en cuestión tiene una capacidad notable de recepción de materia prima, alcanzando las 180 Tn/h.

De acuerdo con la ley de conservación de la materia, la masa de un sistema cerrado se mantiene constante, independientemente de los procesos que ocurran en su interior. Por lo tanto, la masa que ingresa al sistema debe salir de él o acumularse dentro del mismo.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Acumulación}$$

### 3.4. BALANCE DE ENERGÍA

Para el balance de energía se tiene que tener en cuenta que se aprovechara la energía térmica residual de las 02 etapas de secado. Esta energía térmica son los vahos o vapor de agua resultante de la evaporación de agua en el Scrap en los diferentes equipos de secado. Estos vahos serán recolectados y dirigidos hacia un ciclón de vahos, desde donde serán canalizados hacia el efecto #1 mediante un sistema de tuberías.

Es fundamental considerar las posibles pérdidas de energía debido a la generación de vapor flash en el ciclón de vahos. Estas pérdidas pueden afectar significativamente la eficiencia del proceso y deben ser tenidas en cuenta en el balance de energía general del sistema

$$\dot{m}_{va} = c_{vap} \cdot n \quad (3.1)$$

Donde:

$\dot{m}_{va}$ : Flujo masico de vahos (kg/h)

$c_{vap}$ : Capacidad de evaporación de los equipos (kg/h)

$n$ : Cantidad de equipos

Una vez se tenga definido el flujo masico de vahos, procederemos a definir la cantidad de efectos a diseñar, los cuales serán evaluados como volúmenes de control. Este enfoque nos permitirá la cantidad optima de efectos necesarios para la correcta generación del concentrado. Para ellos, se realizará un balance de energía y flujos masicos, lo cual no servirá para garantizar la eficiencia y efectividad del proceso en su conjunto.

### 3.5. DISEÑO TERMODINÁMICO

#### 3.5.1. Cantidad de Calor Transferido

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_F - T_{Ref}) \quad (3.2)$$

Donde:

Q: Calor transferido en el evaporador (kJ/h)

m: Flujo de la materia (kg/h)

TF: Temperatura de entrada de alimentación (°C)

TRef: Temperatura de referencia, generalmente es 0 (°C)

$$c_p = (1.00\%H + 0.50\%G + 0.32\%S) \cdot 4,184 \quad (3.3)$$

Donde:

Cp: Calor específico del fluido (kJ/ kg °C)

%H: Porcentaje de agua en el pescado

%G: Porcentaje de grasa del pescado

%S Porcentaje de sólidos del pescado

### 3.5.2. Transferencia de Calor

La ecuación más adecuada para hallar las áreas de transferencia de calor en los intercambiadores de calor, y en este caso en particular para los efectos en una planta de evaporación, es la ecuación general de transferencia de calor, que se basa en la diferencia de temperatura media logarítmica.

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD \cdot F_{ln} \quad (3.4)$$

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1) - (\Delta T_2)}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3.5)$$

Donde:

Q: Cantidad de calor transferido al evaporador (kJ/ kg °C)

U: Coeficiente global de transferencia de calor (kJ/h m<sup>2</sup> °C)

A: Área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>)

LMTD: Temperatura media logarítmica (°C)

$\Delta T_1$ : Diferencia de temperatura a la entrada del efecto (°C)

$\Delta T_1$ : Diferencia de temperatura a la salida del efecto ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F_{ln}$ : Factor de corrección de la temperatura media logarítmica (Ver Anexo 1)

### 3.6. DISEÑO MECÁNICO DE EVAPORADOR

#### 3.6.1. Cantidad de tubos necesarios en el efecto

Con el valor obtenido de área de transferencia de calor aproximado, se realiza el diseño de la forma de cada uno de los efectos.

$$A = \pi \cdot D_o \cdot L \cdot N_t \quad (3.6)$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ )

$D_o$ : Diámetro externo del tubo (m)

L: Longitud del tubo (m)

$N_t$ : Número de tubos

#### 3.6.2. Diámetro de la coraza

El diámetro de la Coraza de un intercambiador de calor se define como:

$$D_s = 0.637 * \sqrt[2]{\frac{C_L}{C_{Tp}} \left[ \frac{A(P_T)^2 D_o}{L} \right]^{1/2}} \quad (3.7)$$

Donde:

$D_s$ : Diámetro de la coraza (m)

$C_L$ : Constante en función del arreglo de tubos

$C_{Tp}$ : Constante en función de la cantidad de paso de tubos

A: Área de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ )

$D_o$ : Diámetro externo del tubo (m)

L: Longitud del tubo (m)

$P_t$ : Variable adimensional conocida como paso transversal

### 3.6.3. Espesor de coraza

Para el diseño mecánico de los espesores de los efectos se hará uso de la norma ASME y TEMA. En los cuales se estará considerando esfuerzos combinados, tales como esfuerzos por acción del viento, el propio peso del equipo y esfuerzos debido a la presión interna en el los efectos.

#### Esfuerzo por presión interna

Para el esfuerzo por presión interna se considera dos tipos:

##### Costuras largas

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (3.8)$$

##### Costuras circunferenciales

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (3.9)$$

Donde:

t: espesor de la coraza (m)

P: Presión de diseño o presión de trabajo máximo permitida (N/m<sup>2</sup>)

R: Diámetro interior de la coraza (m)

S: Valor de esfuerzo del material o esfuerzo real (N/m<sup>2</sup>)

E: Eficiencia de las juntas soldadas

#### Carga por viento

$$V = P_W \cdot D \cdot H \quad (3.10)$$

$$M = V * h \quad (3.11)$$

$$M_T = M - h_T(V - 0.5P_W D h_T) \quad (3.12)$$

$$S = \frac{M}{R^2 \pi t} \quad (3.13)$$

$$t = \frac{M}{R^2 \pi S E} \quad (3.14)$$

Donde:

V: Fuerza cortante (N)

D: Ancho del recipiente (m)

H: Longitud del recipiente (m)

Pw: Presión del viento (N/m<sup>2</sup>)

M: Momento en la base (N.m)

M<sub>T</sub>: Momento en la costura inferior (N.m)

h<sub>T</sub>: Distancia de la base a la sección bajo consideración (m)

S: Valor de esfuerzo del material o esfuerzo real (N/m<sup>2</sup>)

R: Radio medio del recipiente (m)

E: Eficiencia de las juntas soldadas

**Esfuerzo debido al peso**

$$W = w_{coraza} + w_{tubos} \quad (3.15)$$

$$W = \rho \cdot A \cdot H \cdot g \cdot 1.5 + \#n_{tubos} w_t \cdot L \cdot g \quad (3.16)$$

$$s = \frac{W}{AE} \quad (3.17)$$

Donde:

W: Peso total (N)

ρ: Densidad del acero AISI 304 (kg/m<sup>3</sup>)

H: Longitud del recipiente (m)

g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

w<sub>t</sub>: Peso de tubos (kg/m)

A: Área de carga sobre carcaza (N.m)

S: Valor de esfuerzo del material o esfuerzo real (N/m<sup>2</sup>)

E: Eficiencia de las juntas soldadas

### 3.6.4. Diseño de espejos de tubos

Los espejos de tubos son elementos que contiene perforaciones en donde se colocan los tubos en una posición longitudinal los cuales son usados para la transferencia de calor. También tiene la función de dividir el flujo de vahos y concentrados. El diseño de estos elementos se hace por medio de la norma TEMA, con lo antes mencionado se aplicará la ecuación:

$$t = \frac{FG}{3} \cdot \sqrt{\frac{P}{nS}} \quad (3.18)$$

Donde:

t: Espesor de espejo (m)

F: Constante que depende del tipo de espejo

G: diámetro medio del empaque o carcasa

S: Valor de esfuerzo del material o esfuerzo real (N/m<sup>2</sup>)

n: Constante que depende del tipo de arreglo

P: Esfuerzo debido al peso de los tubos(N/m<sup>2</sup>)

Para arreglos triangulares:

$$n = 1 - \frac{0.907}{\left[\frac{p}{d_o}\right]^2} \quad (3.19)$$

Donde:

p: Paso de tubos (m)

do: Diámetro exterior de tubos (m)

### 3.6.5. Diseño de pernos de anclaje

#### Área dentro del círculo de pernos

$$A_B = \frac{\pi}{4} [(D_{in} + 2l_2 + 2l_3)^2 - D_{in}^2] \quad (3.20)$$

Donde:

AB: Área dentro del círculo de pernos (m<sup>2</sup>)

Din: Diámetro de coraza (m)

l2 y l3: Distancia del perno de anclaje respecto al diámetro de coraza (m) (Ver Anexo 5)

**Tensión máxima en la circunferencia de pernos**

$$T = \frac{M}{2A_B} - \frac{(w_{coraza} + w_{tubos} + w_{vapor} + w_{concentra})}{C_B} \quad (3.21)$$

**Área requerida y esfuerzo máximo de los pernos de anclaje**

$$B_A = \frac{TC_B}{3S_B N} \quad (3.22)$$

$$S_B = \frac{TC_B}{3B_A N} \quad (3.23)$$

Donde:

T: Tensión máxima (N/m)

BA: Área requerida de un perno (m<sup>2</sup>)

SB: Esfuerzo en el perno ancla (N/m<sup>2</sup>)

AB: Área dentro del círculo de pernos (m<sup>2</sup>)

CB: Circunferencia del círculo de los pernos (m)

M: Momento en la base debido a viento o sismo (N.m)

N: Número de pernos de anclaje

W: Peso del recipiente durante la instalación (N)

**3.6.6. Diseño de espesor de anillo base**

**Constante K y fuerza de tracción sobre la circunferencia de pernos**

$$k = \frac{1}{1 + \frac{S_a}{nf_{cb}}} \quad (3.24)$$

$$F_t = \frac{M - WzD}{jD} \quad (3.25)$$

Donde:

k: constante adimensional

Sa: Esfuerzo de tensión en los pernos (N/m<sup>2</sup>)

n: Relación del módulo de elasticidad del acero al del concreto (Ver tabla E, Anexo 7)

fc<sub>b</sub>: Esfuerzo de compresión en el concreto, en el círculo de los pernos (N/m<sup>2</sup>)

n: Constante que depende del tipo de arreglo

F<sub>t</sub>: Carga de tensión en el anillo base (N)

M: Momento en la base debido a viento o sismo (N.m)

W: Peso del recipiente (N)

D: Diámetro del círculo de los pernos de anclaje (m)

J y z: Constantes respecto a K (Ver tabla D, Anexo 7)

**Carga de compresión del anillo base sobre el concreto**

$$F_c = F_T + W \quad (3.26)$$

$$l_4 = l - t_s \quad (3.27)$$

$$f_{cb} = \frac{F_c}{(l_4 + n \cdot t_s)rC_c} \quad (3.28)$$

**Máximo esfuerzo de compresión en el extremo de anillo base**

$$f_c = f_{cb} \frac{2kD + l}{2kd} \quad (3.29)$$

**Espesor de anillo base**

$$t_b = l_1 \sqrt{\frac{f_c}{S}} \quad (3.30)$$

Donde:

F<sub>c</sub>: Carga de compresión del anillo base sobre concreto(N)

l: Ancho de anillo base (m)

l4: Ancho útil de anillo base (m)

ts: Espesor por corrosión, por noma es igual a 0.005 (m)

r: Radio de circunferencia de pernos (m)

Cc: Constantes respecto a K (Ver tabla D, Anexo 7)

fc: Esfuerzo de compresión en el extremo de anillo (N/m<sup>2</sup>)

l1: Ancho de anillo base (m)

S: Valor de esfuerzo del material o esfuerzo real de anillo base (N/m<sup>2</sup>)

### 3.6.7. Diseño de ductos de vahos

#### Caudal de vahos

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{vapor} \cdot v_{vapor}}{3600} \quad (3.31)$$

#### Diámetro de ducto de vahos

$$D_{vahos} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \quad (3.32)$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Caudal de vahos (m<sup>3</sup>/s)

$\dot{m}_{vapor}$ : Flujo masico de vahos (kg/h)

vapor: Volumen especifico de vapor (m<sup>3</sup>/kg)

Dvahos: Diámetro de ducto (m)

V: Velocidad de vahos (m/s)

### 3.6.8. Diseño de tuberías de circulación y alimentación

$$Q = \frac{\dot{m}_{concentrado}}{\rho \cdot 3600} \quad (3.33)$$

$$Q = V \cdot A \quad (3.34)$$

Donde:

Q: Caudal de concentrado ( $m^3/s$ )

$\dot{m}_{concentrado}$ : Flujo masico de concentrado (kg/h)

$\rho$ : Densidad de concentrado ( $kg/m^3$ ) (Ver Anexo 9)

V: Velocidad de concentrado (m/s)



## CAPÍTULO IV.

### 4. INGENIERÍA DEL PROYECTO

#### 4.1. CÁLCULO DEL BALANCE DE MATERIA

En tabla 2 se muestra los datos brindados por el Ministerio De Energía y minas, los cuales nos ayudaran en nuestro balance de materia desde el ingreso de la materia prima hasta la producción de harina de pescado. Para el diseño de nuestra planta de evaporación, nos enfocaremos únicamente en las etapas que van hasta la concentración del producto.

**Tabla 2:** Datos de balance de materia Balance – Industria pesquera

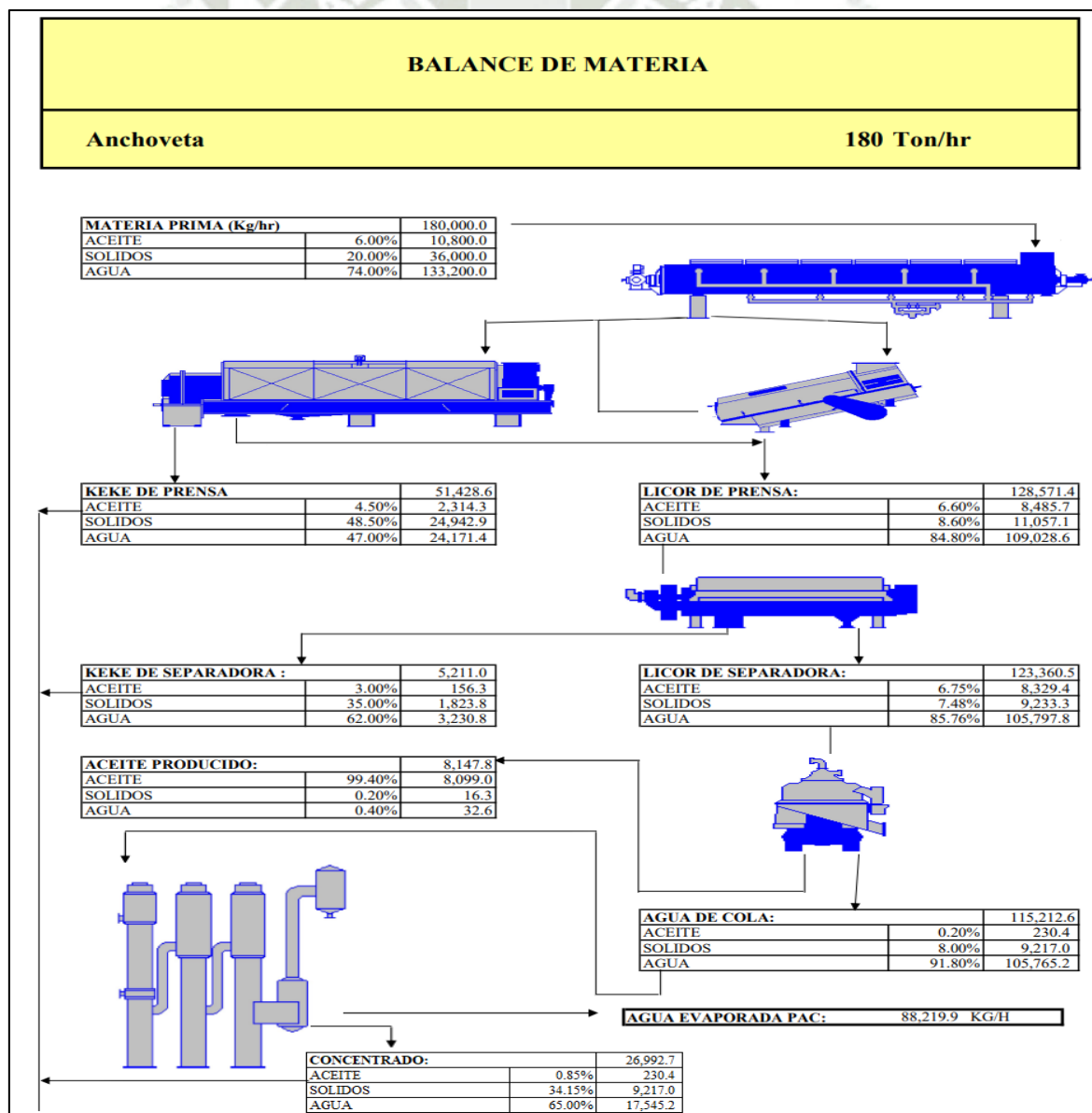
<b>Nombre</b>	<b>Ingreso de datos</b>
<b>Especie de pescado</b>	Anchoveta
<b>Grasa en materia prima</b>	6,00%
<b>Sólidos en materia prima</b>	20,00%
<b>Humedad en materia prima</b>	74,00%
<b>Humedad en keke de prensa</b>	47,00%
<b>Grasa en keke de prensa</b>	4,50%
<b>Sólidos en licor de prensa</b>	8,60%
<b>Humedad en sólidos de separadora</b>	62,00%
<b>Grasa en sólidos de separadora</b>	3,00%
<b>Humedad en aceite</b>	0,40%
<b>Sólidos en aceite</b>	0,20%
<b>Grasa en agua de cola</b>	0,20%
<b>Sólidos en agua de cola</b>	8,00%
<b>Sólidos totales en concentrado</b>	35,00%
<b>Humedad en concentrado</b>	65,00%
<b>Humedad salida Pre-secado</b>	45,00%

<b>Humedad salida secado final</b>	8.00%
<b>Adición de concentrado a Pre-secado</b>	100.00%
<b>Valores de control</b>	<b>Valores de balance</b>
<b>Humedad de harina final (recomendado)</b>	8.0%
<b>Contenido de aceite en harina final</b>	6.4%

Nota: Adaptado de la Dirección General de Eficiencia Energética (2017)

En la figura 18, se puede observar el flujo de la materia en los diferentes procesos de la producción de harina de pescado, teniendo como datos resaltantes el concentrado teórico para una capacidad de planta de 180 Tn/h.

Figura 16: Balance de materia para una planta de 180 Tn/h



Con el balance de materia mostrado en la figura 18 se definirá la cantidad de efectos necesarios para la evaporación de agua y generación de concentrado. En la tabla 3 se mostrarán los datos relevantes del balance de materia.

**Tabla 3:** *Datos de entrada de flujos de materia*

Descripción	Valor	Unidades
Agua de cola	115220	kg/h
Concentrado	27000	kg/h
Agua evaporada	88220	kg/h
Sólidos en agua de cola	8	%
Sólidos en concentrado	35	%

#### 4.2. CÁLCULO DEL FLUJO VAHOS Y NUMERO DE EFECTOS

Para el cálculo de vahos se necesitan los datos técnicos de evaporación de cada equipo en las etapas de secado. A continuación, se elabora una tabla en la cual se muestran las capacidades de los equipos.

**Tabla 4:** *Capacidades de evaporación de equipos*

Descripción	Capacidad De Vaporación	Unidades	Cantidad
Secador rotadiscos	3500	kg/h	5
Secador rotatubos	9000	kg/h	2

Se calcula el flujo masico de vahos generado en las etapas de secado para llevar a cabo la concentración final del agua de cola, haciendo uso de la ecuación 3.1. Se debe considerar pérdidas de 6% por generación de vapor flash en el ciclón de vahos.

$$\dot{m}_{va} = c_{vap} * n$$

$$\dot{m}_{va} = \left[ \left( 3500 \frac{Kg}{h} * 5 \right) + \left( 9000 \frac{Kg}{h} * 2 \right) \right] * 0,94$$

$$\dot{m}_{va} = 33370 \frac{kg}{h}$$

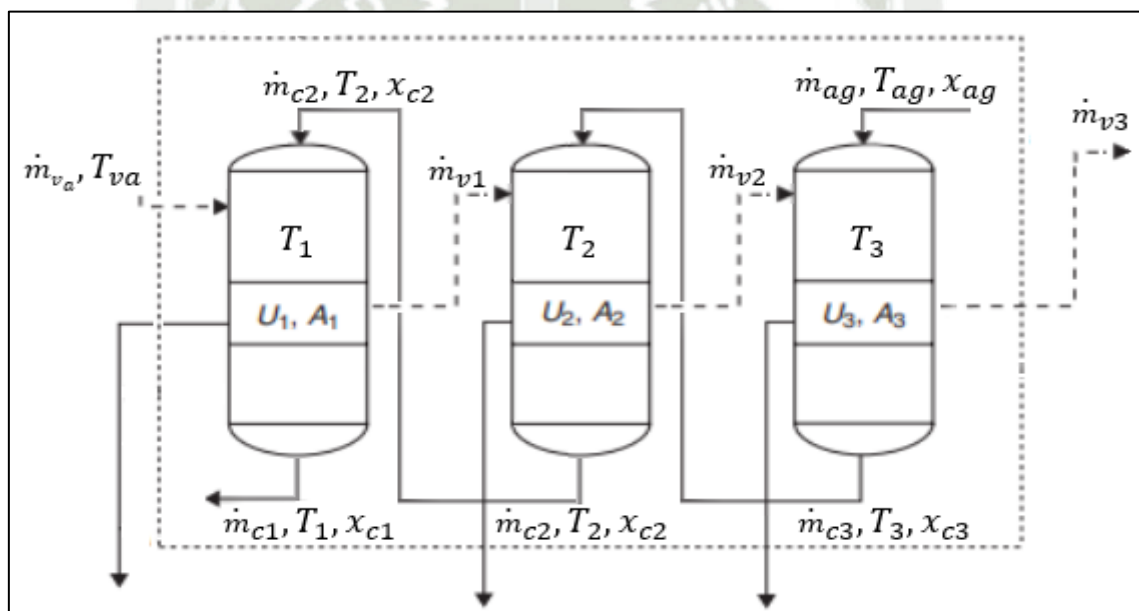
Con el valor obtenido del flujo masico y la cantidad de agua evaporada de la tabla 3, se calura el número de efectos.

$$\#Efectos = \frac{88220 \frac{Kg}{h}}{33370 \frac{Kg}{h}} = 2,6 \cong 3$$

### 4.3. CÁLCULO TERMODINAMICO

Con el número de efectos definidos, se realizará el balance de energía y análisis termodinámicos de la planta de evaporación. En la figura 19 se muestra la distribución de flujos masicos de vahos y concentrado.

**Figura 17:** Esquema termodinámico para balance de masa y energía



Determinando Flujo de agua de Cola y Concentrado en cada efecto:

$$\dot{m}_{ag}x_0 = \dot{m}_{c1}x_1 = \dot{m}_{c2}x_2 = \dot{m}_{c3}x_3 \quad (4.1)$$

Donde:

m<sub>c1</sub>, m<sub>c2</sub> y m<sub>c3</sub>: Flujo de concentrado para cada efecto (kg/h)

x: concentrado (%)

Además, se cumple que:

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{v3} = \dot{m}_{v \text{ agua evaporada}} \quad (4.2)$$

Para una primera aproximación, se supone que:

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} = \left( \frac{\dot{m}_{v \text{ agua evaporada}}}{3} \right) \quad (4.3)$$

Adicionalmente se tiene que:

$$\dot{m}_{c1} = \dot{m}_{ag} - \dot{m}_{v \text{ agua evaporada}} \quad (4.4)$$

$$\dot{m}_{c1} = \dot{m}_{c2} - \dot{m}_{v1} \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_{c2} = \dot{m}_{c3} - \dot{m}_{v2} \quad (4.6)$$

$$\dot{m}_{c3} = \dot{m}_{ag} - \dot{m}_{v3} \quad (4.7)$$

Desarrollando el balance de energía del primer efecto y considerando despreciables el intercambio de calor al exterior, se tiene:

$$\sum \dot{m}_i * h_i = \sum \dot{m}_s * h_s$$

### Efecto I

$$\dot{m}_{va} h_{g \text{ vahos}} + \dot{m}_{c2} C_{p \ c2} (T_2 - T_{ref}) = \dot{m}_{v1} h_{g1} + \dot{m}_{c1} C_{p \ c1} (T_1 - T_{ref}) + \dot{m}_{va} h_{f \text{ vahos}} \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_{va} h_{f \text{ vahos}} + \dot{m}_{c2} C_{p \ c2} (T_2 - T_{ref}) = \dot{m}_{v1} h_{g1} + \dot{m}_{c1} C_{p \ c1} (T_1 - T_{ref}) \quad (4.9)$$

### Efecto II

$$\dot{m}_{v1} h_{g \ v1} + \dot{m}_{c3} C_{p \ c3} (T_3 - T_{ref}) = \dot{m}_{v2} h_{g2} + \dot{m}_{c2} C_{p \ c2} (T_2 - T_{ref}) + \dot{m}_{v1} h_{f \ v1} \quad (4.10)$$

$$\dot{m}_{v1} h_{f \text{ v1}} + \dot{m}_{c3} C_{p \ c3} (T_3 - T_{ref}) = \dot{m}_{v2} h_{g2} + \dot{m}_{c2} C_{p \ c2} (T_2 - T_{ref}) \quad (4.11)$$

### Efecto III

$$\dot{m}_{v2} h_{g \ v2} + \dot{m}_{ag} C_{p \ ag} (T_{ag} - T_{ref}) = \dot{m}_{v3} h_{g3} + \dot{m}_{c3} C_{p \ c3} (T_3 - T_{ref}) + \dot{m}_{v2} h_{f \ v2} \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_{v2} h_{f \text{ v2}} + \dot{m}_{ag} C_{p \ ag} (T_{ag} - T_{ref}) = \dot{m}_{v3} h_{g3} + \dot{m}_{c3} C_{p \ c3} (T_3 - T_{ref}) \quad (4.13)$$

Donde:

hfg vahos: Entalpía de vahos (kJ/kg)

hfg v1, hfg v2 y hfg v3: Entalpía de vapor de cada efecto (kJ/kg)

mva: Flujo de vahos (kg/h)

m<sub>v</sub>1, m<sub>v</sub>2 y m<sub>v</sub>3: Flujo de vapor para cada efecto (kg/h)

C<sub>p</sub>: Capacidad calorífica (kJ/kg°C)

Tag: Temperatura del agua de cola al ingreso (°C)

T1, T2 y T3: Temperatura en cada efecto (°C)

En la Tabla 5 se presenta una recopilación de los datos provenientes de la planta de evaporación actual de la empresa en estudio. Estos datos son fundamentales para garantizar que se reflejen con precisión las condiciones y requerimientos actuales. Los datos recopilados de campo serán promediados, asegurando que sean representativos y confiables para respaldar de manera efectiva el diseño de la nueva planta de evaporación.

**Tabla 5:** *Datos de campo*

Ítem	T Ingreso de vahos (°C)	T Salida de vahos (°C)	P Ingreso de vahos (mmHg)	T Efecto I (°C)	T Efecto II (°C)	T Efecto III (°C)
1	97	63	-135.6	80	60	39
2	97	63	-112	83	61	39
3	97	62	-135.8	85	63	39
4	96	69	-150.6	82	67	37
5	96	66	-140.3	83	68	37
6	96	67	-165.1	84	62	40
7	96	62	-141.1	83	60	41
8	95	60	-155	82	58	39
9	94	60	-134	79	53	38
10	96	62	-126	81	53	38
11	94	64	-120	78	55	38
12	94	61	-127	81	60	49
13	96	62	-124	83	60	47
14	Prom 96	63	136	82	60	40

Una vez obtenido todos los datos de ingreso, se procede a realizar el paso a paso del diseño termodinámico de la plata de evaporación.

### Paso 1

Balance de materia para calcular la cantidad total evaporizada ( $\dot{m}_{v1}$ ,  $\dot{m}_{v2}$  y  $\dot{m}_{v3}$ ) y la cantidad de concentrado ( $\dot{m}_{c1}$ ). Los valores de flujos masicos fueron extraídos de la tabla 3.

1<sup>ra</sup> aproximación aplicando la ecuación (4.1)

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} = \left( \frac{\dot{m}_{v \text{ agua evaporada}}}{3} \right)$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} = \left( \frac{88220 \text{ Kg/h}}{3} \right)$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} = 29406,7 \text{ Kg/h}$$

Calculamos los flujos masico de los concentrados aplicando las ecuaciones (4.6), (4.5) y (4.7)

$$\dot{m}_{c1} = \dot{m}_{ag} - \dot{m}_{v \text{ agua evaporada}}$$

$$\dot{m}_{c1} = (115220 - 88220) \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 27000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{c3} = \dot{m}_{ag} - \dot{m}_{v3}$$

$$\dot{m}_{c3} = (115220 - 29406,7) \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 85813,3 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{c2} = \dot{m}_{c3} - \dot{m}_{v2}$$

$$\dot{m}_{c2} = (85813,3 - 29406,7) \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 56406,6 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

### Paso 2

Con los flujos masicos de los concentrados en los diferentes efectos, procederemos a calcular los porcentajes de concentrado con la ecuación (4.1), el  $x_1$  es un valor conocido de la tabla 3.

$$\dot{m}_{c1}x_1 = \dot{m}_{c2}x_2 = \dot{m}_{c3}x_3$$

$$27000 \frac{Kg}{h} * 0.35 = 56406.6 \frac{Kg}{h} x_2$$

$$x_2 = 0,1675$$

$$27000 \frac{Kg}{h} * 0,35 = 85813,3 \frac{Kg}{h} x_3$$

$$x_3 = 0,1101$$

### Paso 3

En este paso se hallará las capacidades caloríficas del concentrado en cada efecto para esto se empleará la tabla 6.

**Tabla 6:** Capacidades caloríficas del concentrado

Efectos de las variaciones de la capacidad Calorífica, Cp, con la concentración del Agua de Cola	
Concentración % solidos	Cp. calorías/gr.°C
8	0,93
10	0,91
20	0,89
30	0,7
35	0,69
41	0,68
48	0,67

*Nota: Adaptado de Honores & Casique et al. (2016)*

Interpolando los porcentajes de concentrado calculados en el paso 2, se obtiene las siguientes capacidades caloríficas

$x_{ag} = 8\%$	$C_{p_{ag}} = 0,930 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$	$= 3,891 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$
$x_{c1} = 35\%$	$C_{p_{c1}} = 0,690 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$	$= 2,887 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$
$x_{c2} = 16,75\%$	$C_{p_{c2}} = 0,897 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$	$= 3,753 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$
$x_{c3} = 11,01$	$C_{p_{c3}} = 0,908 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$	$= 3,800 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$

#### Paso 4

En la figura 18 se observa la aplicación de las ecuaciones de balance de energía y flujos masicos en el software EES. los resultados calculados por el Software EES nos ayudaran a comprender y modelar el comportamiento térmico dentro del sistema de evaporación. Adicionalmente, podremos explorar diferentes escenarios, ajustar parámetros y optimizar el diseño de la planta para garantizar su eficiencia y rendimiento óptimo.

**Figura 18:** Ecuaciones del balance de energía en los 3 efectos

Hallamos los calores latentes del vapor de agua

$$\Delta h_{v\text{ahos}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}, T = T_{va}) \quad \text{Calor latente transferido al efecto I}$$

$$\Delta h_{v1} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}, T = T_1) \quad \text{Calor latente transferido al efecto II}$$

$$\Delta h_{v2} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}, T = T_2) \quad \text{Calor latente transferido al efecto II}$$

$$\Delta h_{v3} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}, T = T_3) \quad \text{Calor latente transferido al condensador barometrico}$$

$$h_1 = h(\text{water}, T = T_1, x = 1)$$

$$h_2 = h(\text{water}, T = T_2, x = 1)$$

$$h_3 = h(\text{water}, T = T_3, x = 1)$$

Resolviendo la ecuaciones de balance de energia

Efecto I

$$\dot{m}_{va} \cdot \Delta h_{v\text{ahos}} + \dot{m}_{c2} \cdot Cp_{c2} \cdot (T_2 - T_{ref}) = \dot{m}_{v1} \cdot h_1 + \dot{m}_{c1} \cdot Cp_{c1} \cdot (T_1 - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$\dot{m}_{c1} = \dot{m}_{c2} - \dot{m}_{v1} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Efecto II

$$\dot{m}_{v1} \cdot \Delta h_{v1} + \dot{m}_{c3} \cdot Cp_{c3} \cdot (T_3 - T_{ref}) = \dot{m}_{v2} \cdot h_2 + \dot{m}_{c2} \cdot Cp_{c2} \cdot (T_2 - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 4.11}$$

$$\dot{m}_{c2} = \dot{m}_{c3} - \dot{m}_{v2} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Efecto III

$$\dot{m}_{v2} \cdot \Delta h_{v2} + \dot{m}_{ag} \cdot Cp_{ag} \cdot (T_{ag} - T_{ref}) = \dot{m}_{v3} \cdot h_3 + \dot{m}_{c3} \cdot Cp_{c3} \cdot (T_3 - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$\dot{m}_{c3} = \dot{m}_{ag} - \dot{m}_{v3} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Porcentajes de concentrado en cada efecto

Efecto I

$$\dot{m}_{c2} \cdot x_{c2} = \dot{m}_{c1} \cdot x_{c1} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

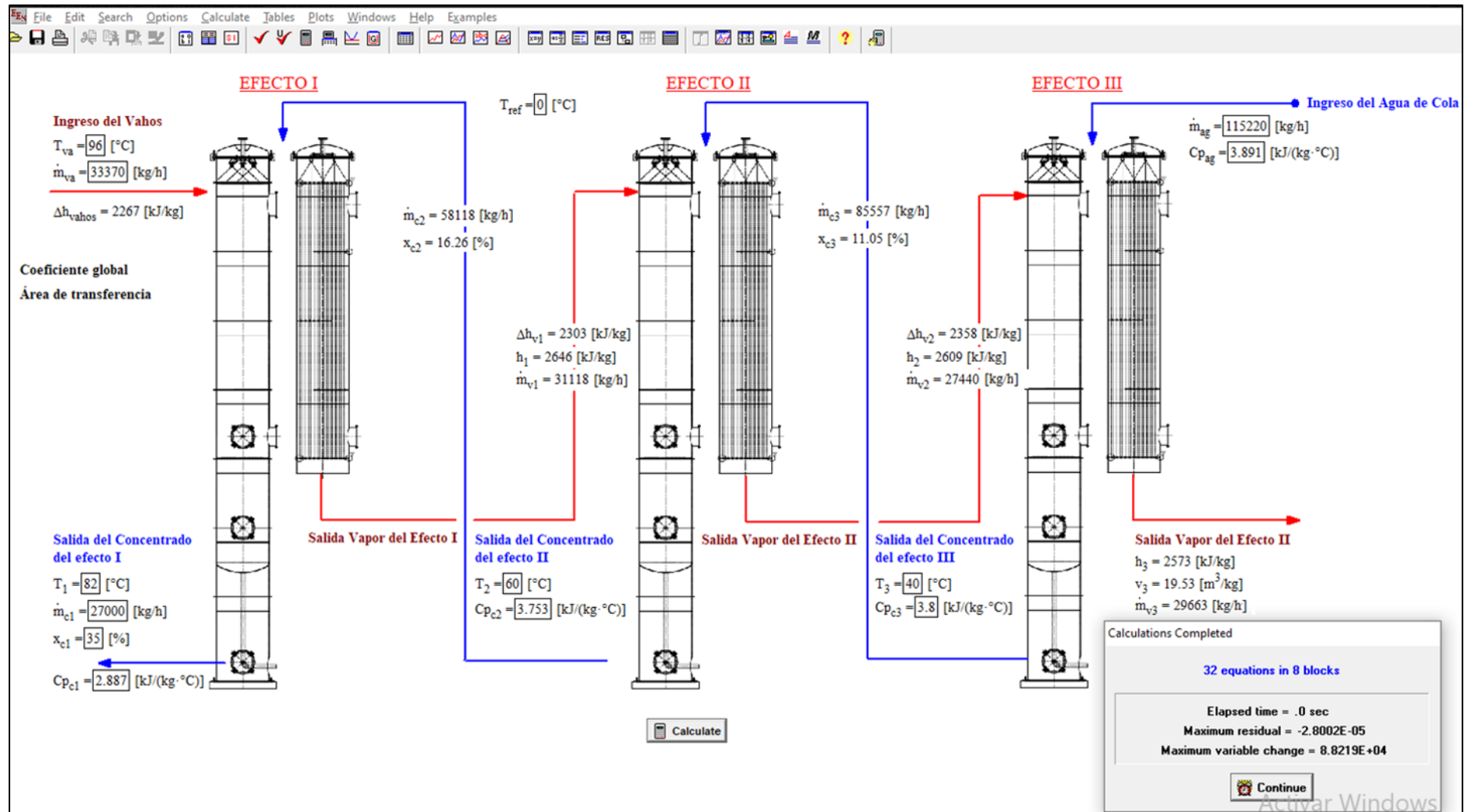
Efecto III

$$\dot{m}_{c3} \cdot x_{c3} = \dot{m}_{c1} \cdot x_{c1} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Cantidad de agua Evaporada

$$\dot{m}_{\text{agua, evap}} = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{v3} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Figura 19: Cálculo termodinámico en el programa EES



Como se ilustra en la figura 19, se calculó los valores  $\dot{m}_{v1}$ ,  $\dot{m}_{v2}$ ,  $\dot{m}_{v3}$  y las concentraciones en cada uno de los efectos, se realizó el siguiente cuadro de resultados:

**Tabla 7:** Resultados obtenidos en el programa EES

Descripción	Variable	Valor	Unidades
Flujo de salida de concentración del efecto 1	$\dot{m}_{c1}$	27000	kg/h
Flujo de salida de concentración del efecto 2	$\dot{m}_{c2}$	58118	kg/h
Flujo de salida de concentración del efecto 3	$\dot{m}_{c3}$	85557	kg/h
Flujo de salida de vapor del efecto 1	$\dot{m}_{v1}$	31118	kg/h
Flujo de salida de vapor del efecto 2	$\dot{m}_{v2}$	27440	kg/h
Flujo de salida de vapor del efecto 3	$\dot{m}_{v3}$	29663	kg/h
Flujo de entrada de vapor al efecto 1 (vahos)	$\dot{m}_{va}$	33370	kg/h
Entalpia del efecto 1	$h_1$	2646	kJ/kg
Entalpia del efecto 2	$h_2$	2609	kJ/kg
Entalpia del efecto 3	$h_3$	2573	kJ/kg

### Paso 5

Por último, procederemos a calcular las áreas de transferencia de calor para cada efecto. Para este punto tener en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor. En la figura 20 se presentan los valores de referencia de estos coeficientes, los cuales guiarán nuestro análisis y cálculos.

**Figura 20:** Coeficientes globales típicos de evaporadores

Tipo	Coeficiente global U	
	BTU/h ft <sup>2</sup> °F	W/m <sup>2</sup> °C
<b>Evaporadores de tubos verticales largos:</b>		
Circulación natural	200 - 600	1000 - 3000
Circulación forzada	400 - 1000	2000 - 5000
<b>Evaporadores de película agitada, líquido newtoniano, viscosidad:</b>		
1 cP	400	2000
1P	300	2000
100 P	120	600

Nota: Recuperado de Basantes et al. (2014)

Como se observa en la figura 21 se hace uso de las ecuaciones (3.4 y 3.5), el coeficiente global de  $1900 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , las entalpías de la tabla 7 para de esta manera calcular el área de transferencia. Como rango de seguridad en la construcción del evaporador se tomará un 15% más del área calculada teóricamente.

**Figura 21:** Ecuación de transferencia de calor

Área de transferencia de calor en cada efecto

$$\text{LMTD}_{\text{Efecto,I}} = \left[ \frac{T_{va} - T_1 - (T_{va,2} - T_2)}{\ln \left( \frac{T_{va} - T_1}{T_{va,2} - T_2} \right)} \right] \cdot F_{\text{LMTD,I}} \quad \text{Temperatura media logarítmica Efecto I}$$

$$\text{LMTD}_{\text{Efecto,II}} = \left[ \frac{T_1 - T_2 - (T_{v2,2} - T_3)}{\ln \left( \frac{T_1 - T_2}{T_{v2,2} - T_3} \right)} \right] \cdot F_{\text{LMTD,II}} \quad \text{Temperatura media logarítmica Efecto II}$$

$$\text{LMTD}_{\text{Efecto,III}} = \left[ \frac{T_2 - T_3 - (T_{v3,2} - T_{\text{Amb}})}{\ln \left( \frac{T_2 - T_3}{T_{v3,2} - T_{\text{Amb}}} \right)} \right] \cdot F_{\text{LMTD,III}} \quad \text{Temperatura media logarítmica Efecto III}$$

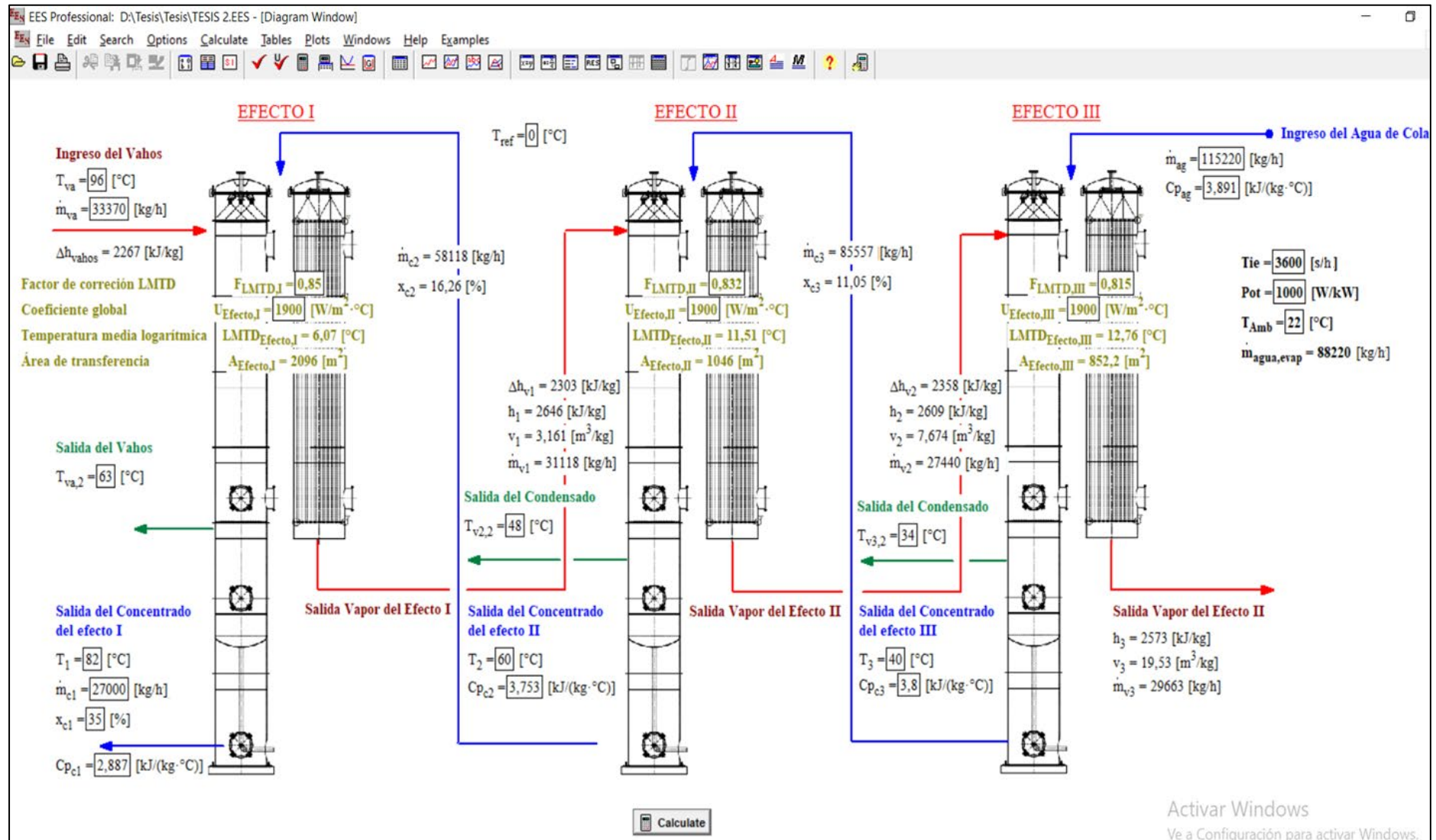
$$A_{\text{Efecto,I}} = 1.15 \cdot \frac{\dot{m}_{va} \cdot \Delta h_{v\text{ahos}} \cdot \text{Pot}}{U_{\text{Efecto,I}} \cdot T_{ie} \cdot \text{LMTD}_{\text{Efecto,I}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto I}$$

$$A_{\text{Efecto,II}} = 1.15 \cdot \frac{\dot{m}_{v1} \cdot \Delta h_{v1} \cdot \text{Pot}}{U_{\text{Efecto,II}} \cdot T_{ie} \cdot \text{LMTD}_{\text{Efecto,II}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto II}$$

$$A_{\text{Efecto,III}} = 1.15 \cdot \frac{\dot{m}_{v2} \cdot \Delta h_{v2} \cdot \text{Pot}}{U_{\text{Efecto,III}} \cdot T_{ie} \cdot \text{LMTD}_{\text{Efecto,III}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto III}$$

Tal como se puede observar en la figura 22, las áreas de transferencia de calor en el efecto I son el doble, o incluso mayores, que en los efectos II y III. Esto se debe a que en el primer efecto ocurre la mayor concentración y evaporación de agua. Con estos valores calculados, se podrán iniciar los cálculos mecánicos correspondientes para la planta de evaporación.

Figura 22: Área de transferencia del efecto I, II y III



En la tabla 8 se muestran los valores previamente calculados, tal como se puede apreciar estos resultados han sido redondeados a su valor entero próximo.

**Tabla 8:** *Valores de las áreas de transferencia en cada efecto*

Descripción	Variable	Valor	Unidades
Área de transferencia del efecto 1	A <sub>1</sub>	2096	m <sup>2</sup>
Área de transferencia del efecto 2	A <sub>2</sub>	1046	m <sup>2</sup>
Área de transferencia del efecto 3	A <sub>3</sub>	853	m <sup>2</sup>

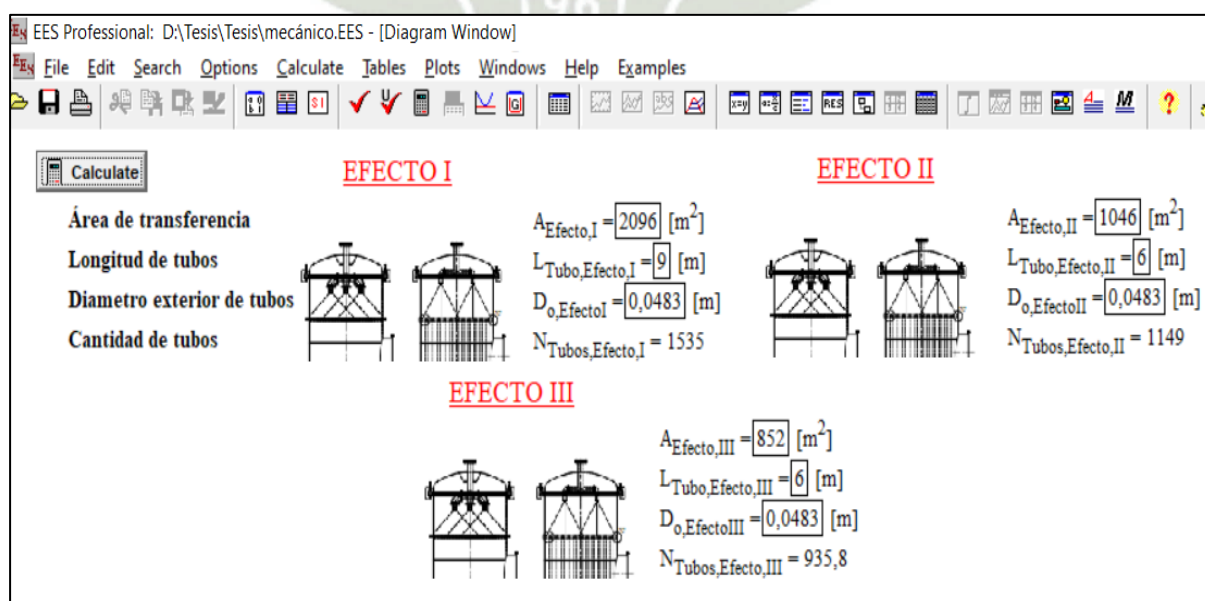
#### 4.4. CÁLCULO MECÁNICO

##### 4.4.1. Cálculo de cantidad de tubos

Con la ecuación (3.6) y la tabla 8, determinaremos la cantidad de tubos verticales necesitaremos en nuestros efectos. Como se está tratando con harina de pescado, el acero a escoger debe ser de grado alimenticio con la finalidad de evitar corrosión y reacciones con la harina; es por todo lo antes mencionado que se optó hacer uso del AISI 304. Adicionalmente, por conceptos de diseño se utilizará tuberías sin costuras de 1 ½” SCH 40 (Ver Anexo 10).

Con las ecuaciones y los datos de entrada ingresados al programa EES, se obtuvieron los resultados que se muestra en la figura 24.

**Figura 23:** *Cantidad de tubos en los 03 efectos*



#### 4.4.2. Cálculo del diámetro de coraza

Una vez hallado el número de tubos por efecto, emplearemos la ecuación (3.8) y los resultados de la figura 23 para definir el diámetro interno de la carcasa o coraza en cada uno de los efectos. Como se puede observar en la figura 26.

Para el dimensionamiento del diámetro interno de la coraza o carcasa en cada uno de los efectos, previamente se deberán definir algunas variables.

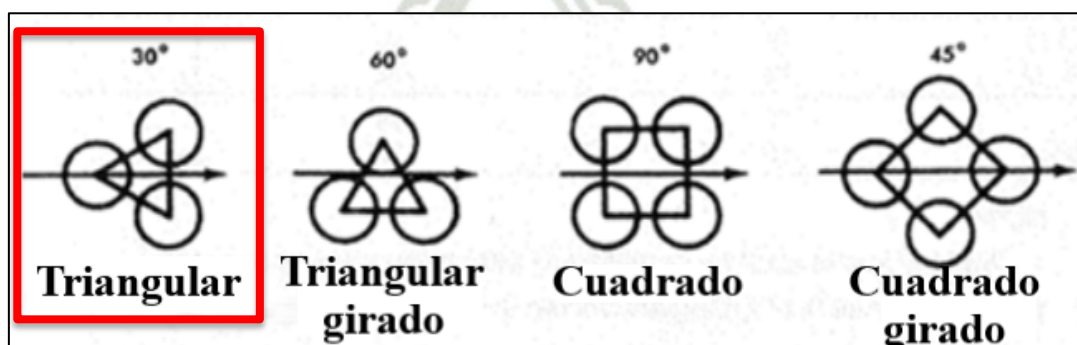
Según nos indica norma TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) la distancia entre los tubos o más conocido como paso ( $P_T$ ) que debe de tener este tipo de intercambiadores con un fluido caliente entrante y saliente de la carcasa es igual a 1,5 veces el diámetro exterior del tubo ( $1,5D_o$ ). En cuanto a la constante  $C_{Tp}$ , se hallará a partir de la cantidad de veces que el fluido recirculará por los tubos, para esto se hará uso de la figura 24.

**Figura 24:** Valor de la constante CTP en función del número de pasos por tubo

Número de pasos por tubo	CTP
1	0,93
2	0,9
3	0,85

El valor  $C_L$  dependerá de la distribución de tubos, tomando el valor de 1 si están orientado a  $45^\circ$  o  $90^\circ$  y si no el valor de 0.87 cuando estén orientados de  $30^\circ$  o  $60^\circ$ .

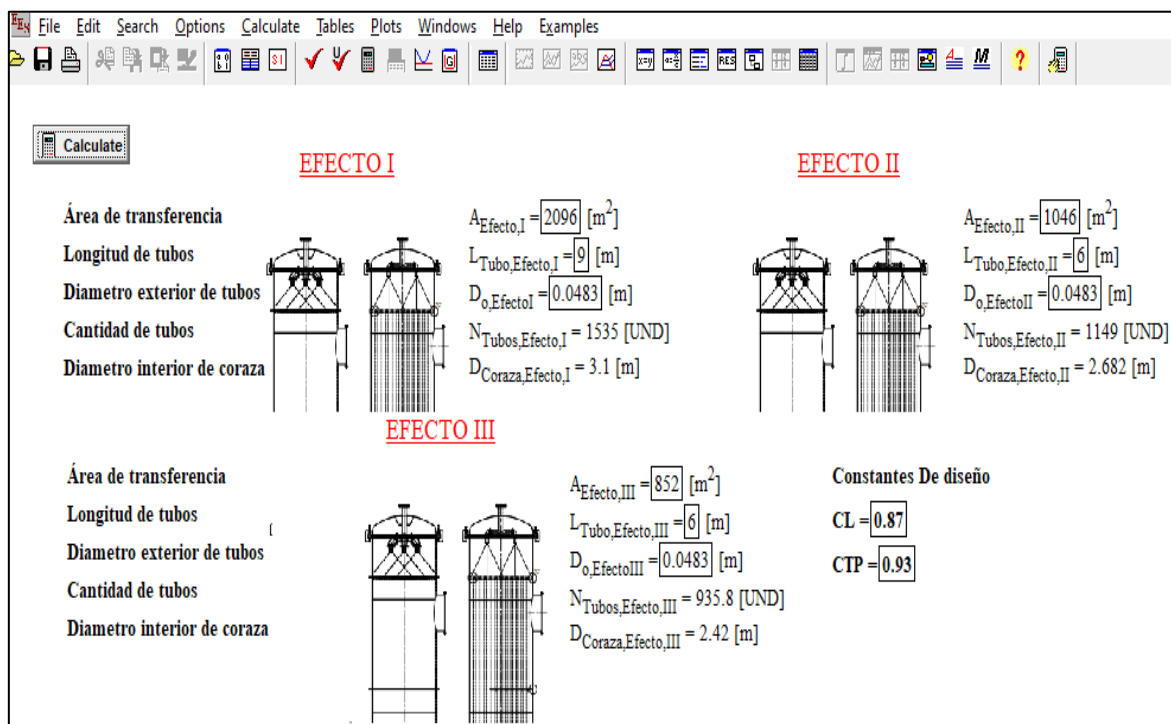
**Figura 25:** Distribución de tubos



*Nota: Adaptado del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales (2007)*

Teniendo definidos todos estos valores procederemos a calcular el diámetro de la coraza en cada efecto, tal como se muestra en la figura 27.

**Figura 26:** Diámetro exterior de espejos e interior de corazas en los efectos



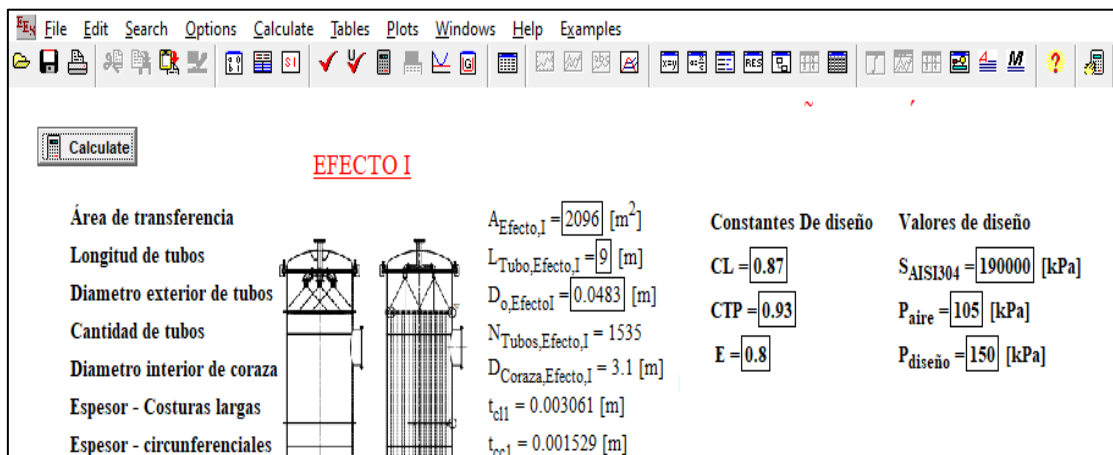
#### 4.4.3. Cálculo de espesor de coraza

Para el cálculo del espesor se tendrán en cuenta 04 clases de esfuerzo presentes en cada uno de los evaporadores, entre ellos se encuentran los 02 esfuerzos por presión interna, esfuerzo por carga de viento y el esfuerzo debido al peso del mismo equipo, para el primer cálculo del espesor haremos uso de las ecuaciones (3.8 y 3.9) y de la tabla 9. Cabe mencionar que los diámetros calculados en el inciso anterior (4.4.2) fueron redondeados al valor superior.

**Tabla 9:** Parámetros para el diseño mecánico

Descripción	Variable	Valor	Unidades
Esfuerzo permisible AISI 304	S	190000	kPa
Presión de diseño	P	150	kPa
Presión del aire (Chimbote)	$P_w$	105	kPa
Diámetro aproximado de coraza – 1er Efecto	$D_{s1}$	3.1	m
Diámetro aproximado de coraza – 2do Efecto	$D_{s2}$	2.7	m
Diámetro aproximado de coraza – 3er Efecto	$D_{s3}$	2.5	m
Eficiencia de la junta lado coraza (Ver Anexo 3)	E	0.8	-

**Figura 27:** *Espesores por costuras largas y circunferenciales*

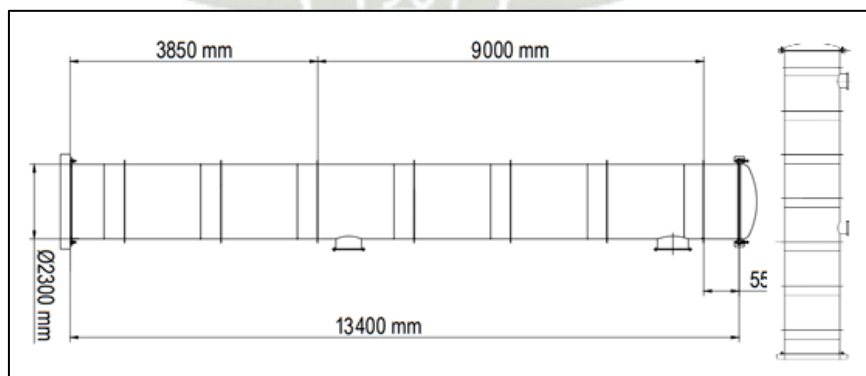


Como se indicaba líneas arriba, ambas ecuaciones se utilizan para calcular el espesor de la coraza en función de la presión interna de diseño, la diferencia radica en al tipo de costuras o soldaduras que se le aplica al recipiente. Los resultados de estos cálculos obtenidos se presentan en la figura 28, donde se puede observar que los espesores varían significativamente.

**4.4.3.1. Efecto I - Carga por viento**

Con la disposición mostrada en la figura 29, los datos de la tabla 9, la ecuación (3.10) y la ecuación (3.11), se realizará el cálculo de espesor debido al esfuerzo y momento provocado por el viento. Hay que tener en cuenta que el diseño es realizado en la ciudad de Trujillo.

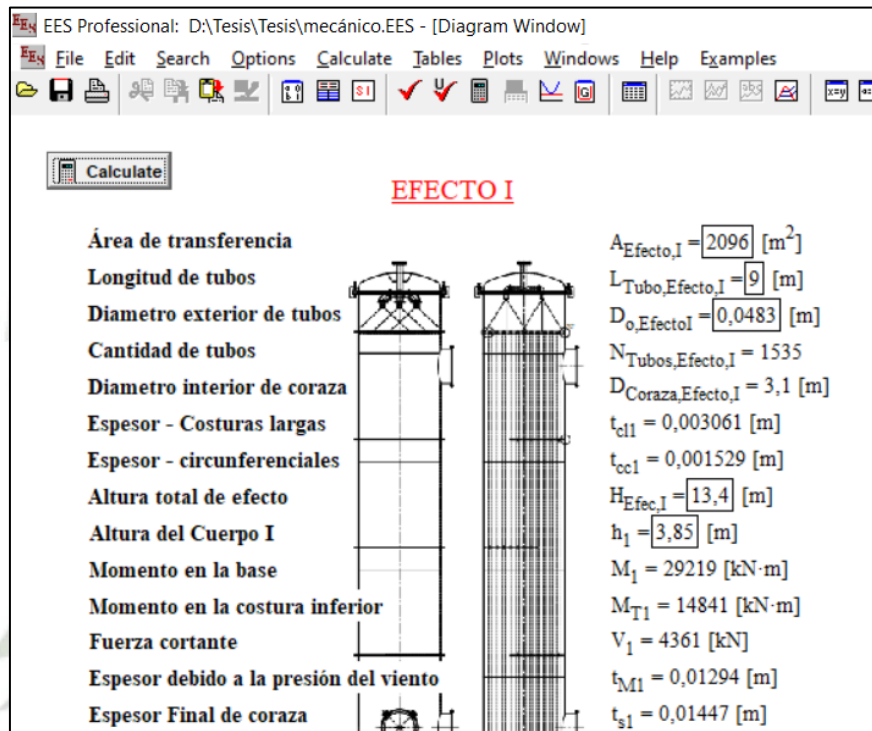
**Figura 28:** *Disposición de coraza de efecto I*



Como los diámetros internos de la coraza serán los mismos en los tres cuerpos del efecto, la suma de las alturas de cada cuerpo (h) será igual a la altura total del efecto (H). En la figura 29 se muestra el momento total, considerando los parámetros previamente mencionados.

Habiendo hallado el momento máximo (14841 kN.m) debido al esfuerzo provocado por la presión del viento, se procederá a calcular el espesor debido a este momento para esto haremos uso de la ecuación (3.14). Teniendo como resultado el siguiente valor:

**Figura 29:** *Espesor de la coraza debido a la presión de aire*



Tal como se muestra en la figura 29 el espesor debido al esfuerzo o carga provocada por el aire es de 12,94 milímetros. Para determinar el espesor final de la coraza se deberán de sumar los resultados de  $t_{M1}$  y  $t_{cc1}$ , según indica la norma TEMA y ASME sección VIII. Teniendo como resultado:

$$t_{s1} = 1,53 \text{ mm} + 12,94 \text{ mm}$$

$$t_{s1} = 14,47 \text{ mm}$$

Como

$$3,06 \text{ mm } (t_{cl1}) < 14,47 \text{ mm } (t_{s1})$$

Se trabajará con el mayor espesor hallado debido a la combinación de los esfuerzos. Considerar que al trabajar con estándares y normas el espesor a escoger será de 15 mm (Ver Anexo 11).

Luego de haber determinado el espesor debido a presiones internas y momentos causado por la velocidad del aire, comprobaremos que este resultado también sea óptimo para soportar el peso del mismo equipo y componente, para esto haremos uso de las ecuaciones (3.15 y 3.16).

**Figura 30:** *Esfuerzo en la coraza debido al peso de los tubos y cuerpo de la coraza*

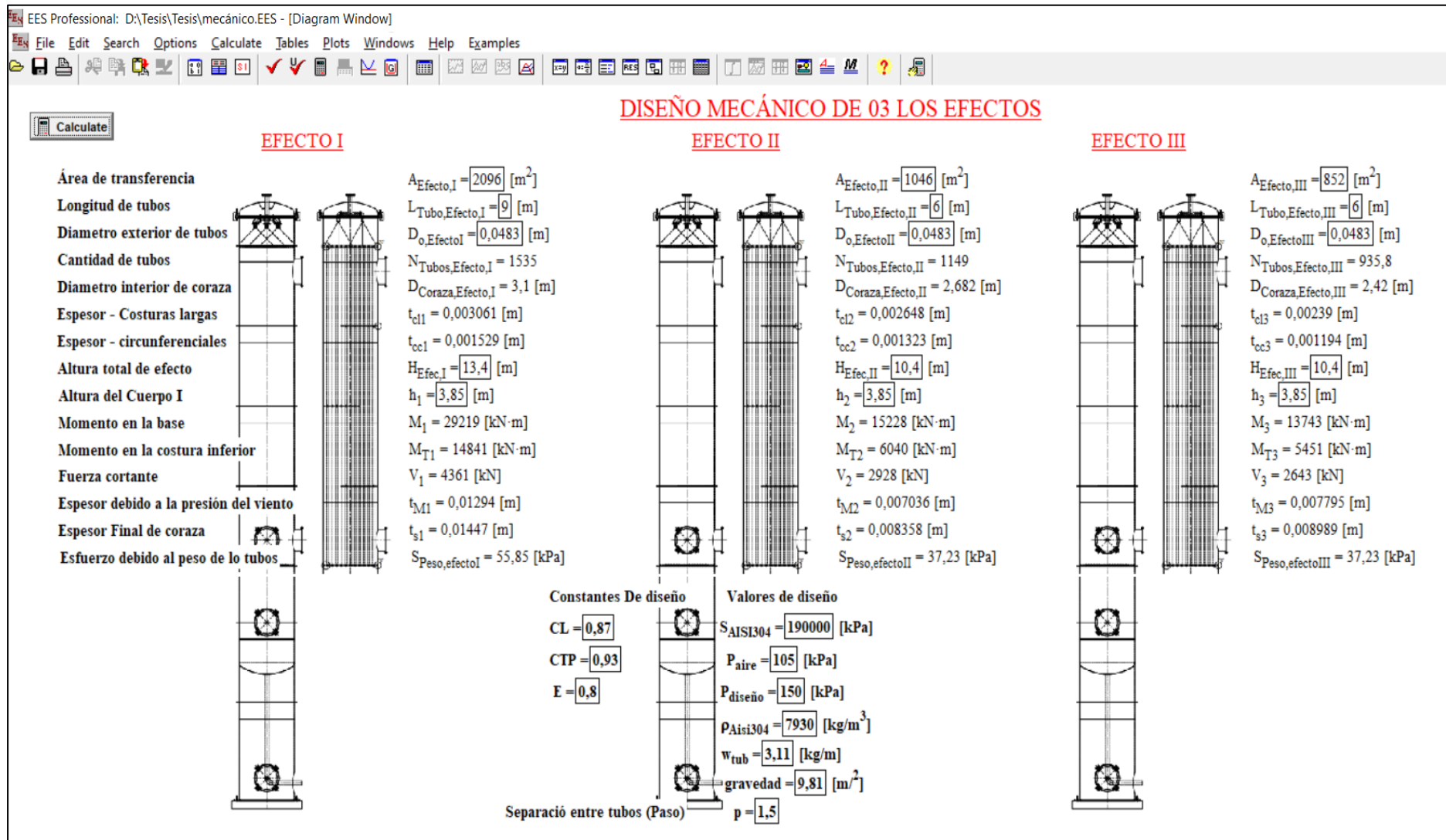
<b>Valores de diseño</b>	
$S_{AISI304} =$	$190000$ [kPa]
$P_{aire} =$	$105$ [kPa]
$P_{diseño} =$	$150$ [kPa]
$\rho_{Aisi304} =$	$7930$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{tub} =$	$3.11$ [kg/m]
$t_{s1} =$	$0.01447$ [m]
<b>Peso de la coraza</b>	$W_{co} = 76314$ [N]
<b>Peso de los tubos</b>	$W_{tu} = 280952$ [N]
<b>Esfuerzo debido al peso de los tubos y coraza</b>	$S_{Peso,efectoI} = 6.1$ [MPa]

Como se muestra en la figura 30, el esfuerzo real debido al peso de las estructuras es mucho menor que el esfuerzo de fluencia del acero (190 MPa), por lo que la selección del espesor es la correcta.

#### 4.4.3.2. Efecto II y III – Espesor de coraza

En el caso de los efectos II y III se repetirá el mismo procedimiento que para el efecto I. Variando el diámetro de la disposición mostrada en la figura 31, la altura de los cuerpos, los datos de la tabla 9, la ecuación (3.10) y la ecuación (3.11), se realizará el cálculo de espesor debido al esfuerzo provocado por la presión el viento.

Figura 31: *Espesor de las corazas en los efectos I, II y III*



Como se aprecia en la figura 31, los espesores de ambos efectos son inferiores a 9 mm. Por lo tanto, considerando que se trabaja con estándares y normativas, se seleccionará un espesor de 9 mm (ver Anexo 11).

Para el efecto II y III no se calculará el esfuerzo debido al peso, debido a que el espesor es menor al del Efecto I. También, se debe tener en cuenta que los efectos II y III cuentan con menor cantidad de tubos y menor diámetro; por lo consiguiente cuenta con un menor peso.

#### 4.4.4. Cálculo de espesor de espejo fijo

Antes de calcular los espesores de los espejos fijos inferior y superior, se deberá de determinar el valor de n el cual se encuentra en base al paso o distancia entre los tubos de los efectos, que como se mencionó líneas arriba será de 1,5. El resultado obtenido se muestra en la figura 32.

**Figura 32:** *Cálculo de la constante dependiente del paso entre tubos*

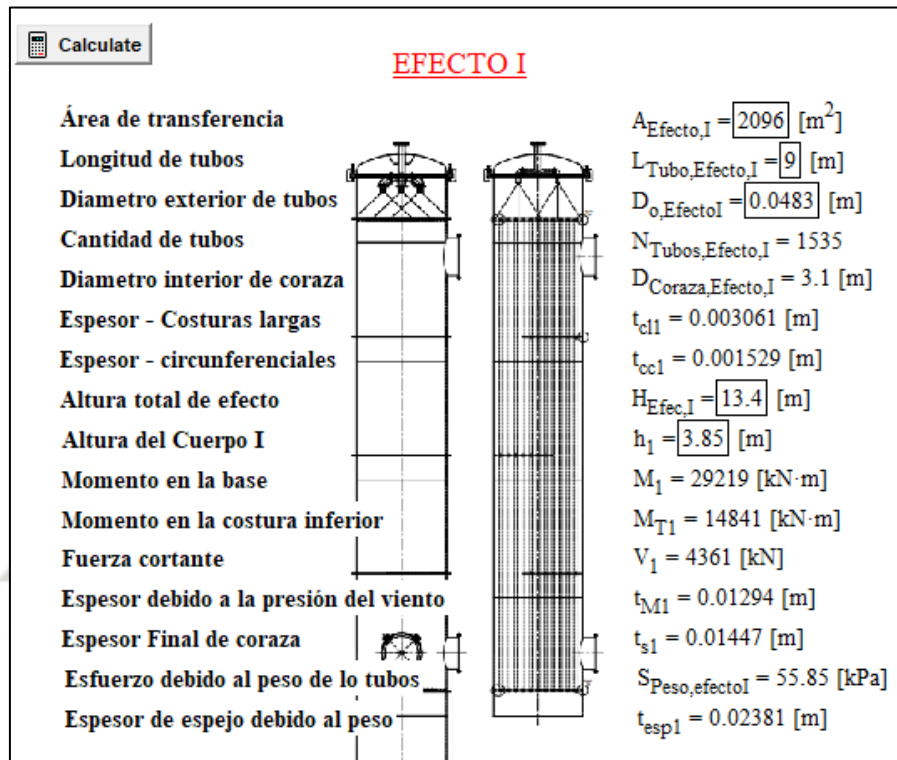
Constante que depende del tipo de arreglo	
$n = 1 - \frac{0.907}{p^2}$	
<b>Constantes De diseño</b>	<b>Valores de diseño</b>
CL = 0.87	S <sub>AISI304</sub> = 190000 [kPa]
CTP = 0.93	P <sub>aire</sub> = 105 [kPa]
E = 0.8	P <sub>diseño</sub> = 150 [kPa]
	ρ <sub>Aisi304</sub> = 7930 [kg/m <sup>3</sup> ]
	w <sub>tub</sub> = 3.11 [kg/m]
	gravedad = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
<b>Separación entre tubos (Paso)</b>	p = 1.5
<b>Constante dependiente del arreglo</b>	n = 0.5969

Haciendo el uso de las ecuaciones (3.16), (3.17) y (3.18) determinaremos los espesores de los espejos fijos, tanto en el nivel superior como en el inferior del equipo. Es importante señalar que los datos relacionados con el peso de la tubería, necesarios para el cálculo, están en el anexo 10.

#### 4.4.4.1. Efecto I – espesor de espejos fijos

Una vez obtenido el valor de  $n$  se hará uso de la ecuación (3.18). tener en cuenta que en este punto la presión de los tubos ayudara a atenuar la fuerza realizada por la presión de diseño.

**Figura 33:** *Cálculo de espesor de espejos fijos en el efecto I*

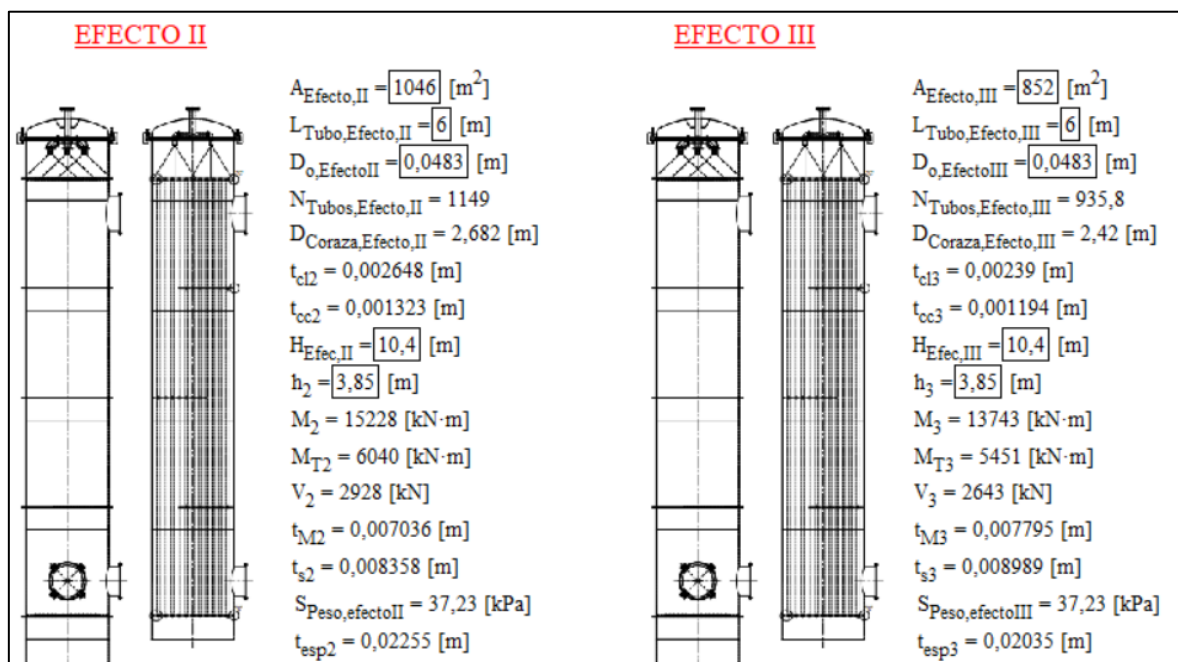


Según los resultados calculados en la figura 33, el espesor del espejo para el efecto I es de 23.81 mm. De acuerdo a los estándares de la norma ASTM A240/A240M, el espesor normalizado es de 25 mm o 1".

#### 4.4.4.2. Efecto II y III – espesor de espejos fijos

La constante  $F$  no se vería afectada a un cambio, dado a que los espesores de la coraza mantienen valores cercanos entre sí. De manera similar sucede con la constante  $n$ , ya que en los tres efectos se ha considerado que el valor del paso entre tubos es igual a 1.5. Siguiendo la metodología del inciso 4.4.4.1, se determinarán los espesores correspondientes de los espejos fijos en los efectos II y III.

**Figura 34:** Cálculo de espesor de espejos fijos en el efecto II y efecto III



Como se puede observar en la figura 34, el espesor del espejo para el efecto II y III son de 22.55 y 20.35 mm. En donde de acuerdo a los estándares de la norma ASTM A240/A240M, el espesor normalizado próximo a estos valores es de 25 mm o 1".

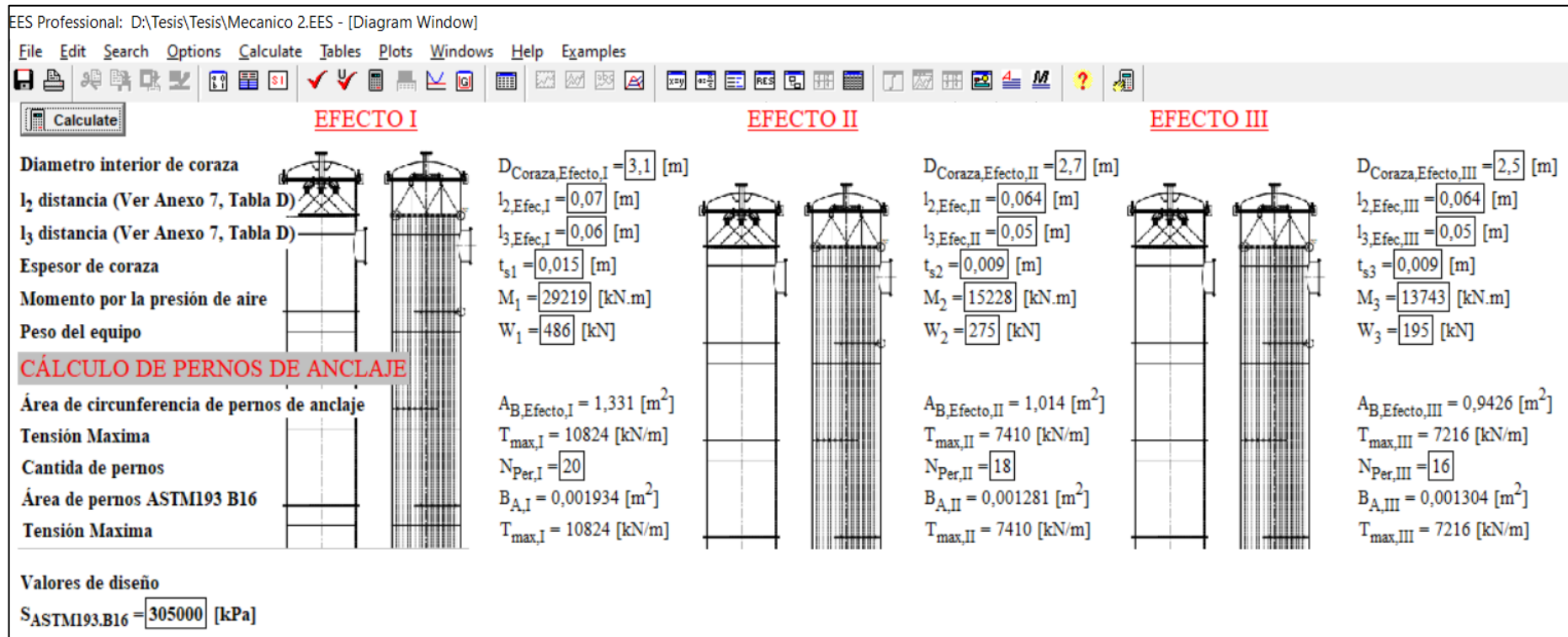
#### 4.4.5. Cálculo de pernos de anclaje

Habiendo calculado los espesores en los evaporadores, se dimensionarán los pernos de anclaje para lo cual haremos uso de las ecuaciones (3.20 y 3.19) y los datos del anexo 5.

Para determinar el diámetro del anillo de los pernos de anclaje se hará uso de la tabla A del anexo 4. Cabe mencionar que, para la resolución de las ecuaciones, se redondearon valores que anteriormente habían sido calculados.

Según nos indica la normal ASME sección II parte D, los pernos de anclaje ASTM193 grado B16 tienen un esfuerzo de fluencia es de 730 MPa, pero para nuestro diseño se tendrá un factor de seguridad de 2,4 de tal manera que nuestro esfuerzo de diseño será de 305 MPa. Adicionalmente la tabla B del anexo 5 nos indica que se debe de contar con un máximo de 20 pernos de anclaje para un diámetro en el círculo de pernos de 3,2 hasta 2,7 m, y menos de 2,7 m se tiene como un máximo de 16 pernos (ASME et al., 2007).

Figura 35: Cantidad de pernos de anclaje por efecto



El área de la raíz de un perno de 2" según la tabla A (ver Anexo 5) es de 1500 mm<sup>2</sup>, y para un perno de 2 ¼", es de 1950 mm<sup>2</sup>. Estos valores deben compararse con las áreas calculadas; si estas áreas son menores que las indicadas en las tablas, el valor se considera correcto. Como se muestra en la figura 35, se calcularon las áreas de los pernos de anclaje para los tres efectos. Los resultados obtenidos son: 20 pernos de anclaje ASTM 193 B16 de 2 ¼" para el primer efecto, 18 pernos de anclaje de 2" para el efecto II y 16 pernos de anclaje de 2" para el efecto III.

#### 4.4.6. Cálculo de espesor de anillo base

Antes de calcular el espesor del anillo base; tener en consideración los datos calculados en los puntos anteriores. Adicionalmente, el valor de la constante K será igual en los 3 efectos, ya que en todos se utilizarán los mismos materiales. Dicho esto, se hará uso de la ecuación (3.24) para determinar la constante K, con el cual se podrá definir las demás constantes.

$$k = \frac{1}{1 + \frac{S_a}{n f_{cb}}}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{200000 \frac{kN}{m^2}}{10 * 21000 \frac{kN}{m^2}}}$$

$$k = 0.5$$

Con el valor K definido, procederemos a extraer las constantes para el cálculo del espesor de anillo base (Ver tabla D, Anexo 5),

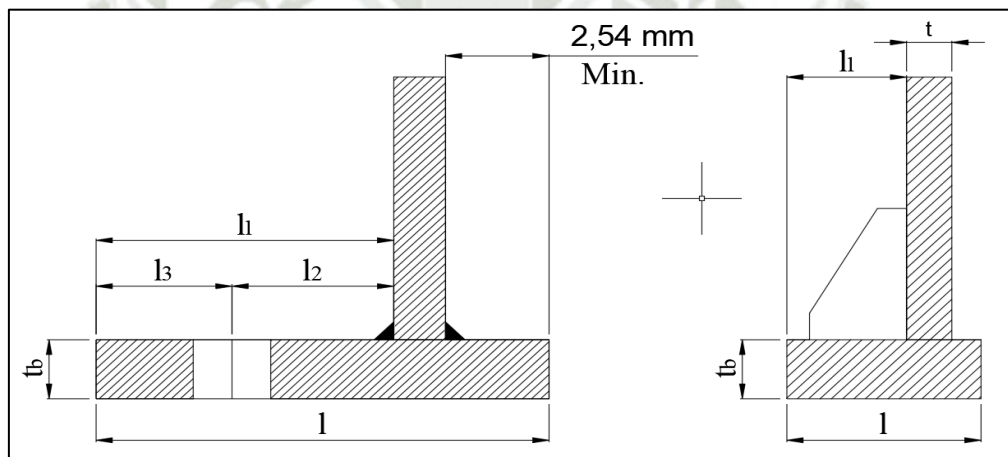
$$C_c = 2.0 \quad C_t = 2.0 \quad j = 0.785 \quad z = 0.393$$

Con las constantes determinada hallaremos la fuerza de tensión sobre el anillo base que ejerce la carga por viento, el cual a la vez es contrarrestado por el peso del equipo. Sobre el anillo base, para realizar este cálculo usaremos la ecuación (3.25).

Con la fuerza de tensión calculada, procederemos a calcular la fuerza de compresión en anillo base sobre el concreto, para esto haremos de la ecuación (3.26)

Una vez hallada la fuerza de compresión definida se calculará el esfuerzo de compresión sobre el concreto para esto tener en cuenta que el anillo base sobre sale hacia el interior de la coraza, esta distancia es con la finalidad de poder realizar una correcta unión entre la coraza y anillo base realizando cordones de soldadura. Esta distancia como se muestra en la figura 36 es de 1" mínimo, para nuestro diseño por criterio propio la distancia será de 1 ½" (38.1 mm). Con todo lo antes mencionado se aplicarán las ecuaciones (3.27 y 3.28).

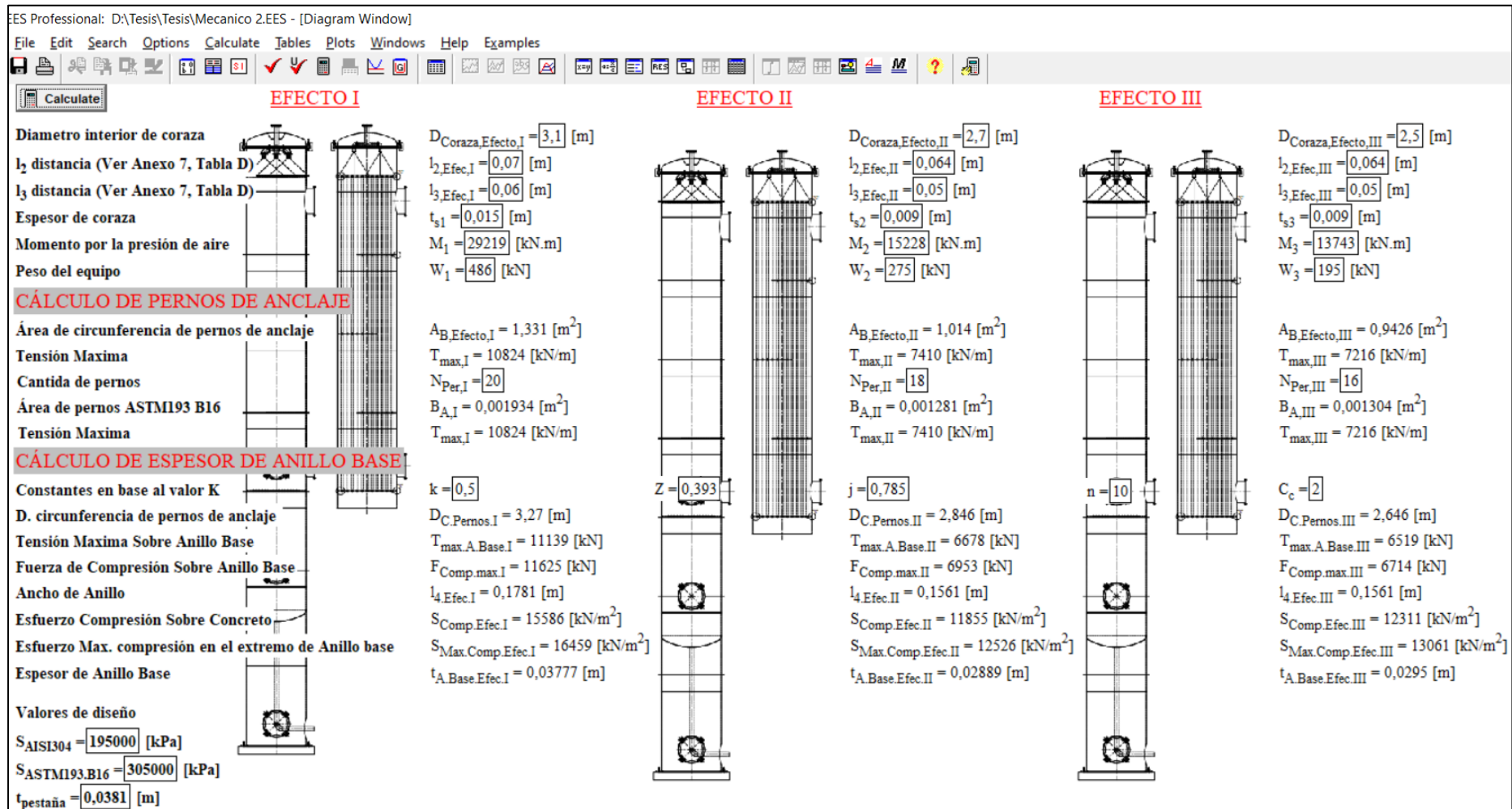
**Figura 36:** Esquema de ancho total de anillo base



*Nota:* Adaptado de Eugene F. Megyesy (1989)

El esfuerzo de compresión calculado sobre el concreto no representa el esfuerzo máximo. Sin embargo, este valor sirve como base para determinar el esfuerzo máximo, que se localiza en el extremo del anillo de base. Para calcular este esfuerzo máximo, utilizaremos la ecuación (3.29). Finalmente, con el esfuerzo máximo de compresión definido, se aplicará la ecuación (3.30).

Figura 37: *Espesor de anillos bases en los efectos*



En la Figura 37 se observa que el espesor calculado para el Efecto I es de 37.77 mm, para el Efecto II de 28.89 mm y para el Efecto III de 29.5 mm. De acuerdo con los valores previamente mencionados y lo establecido en la norma ASTM A240, el espesor normalizado para el Efecto I sería de 1 ½” (38.1 mm), mientras que para los Efectos II y III, el espesor normalizado adecuado es de 1 ¼” (31.75 mm).

#### 4.4.7. Cálculo de pernos y espesor en juntas bridadas entre cuerpos de evaporador

Se seguirá el mismo procedimiento que se usó para el cálculo de los pernos de anclaje, con la diferencia que para este cálculo se harán uso de pernos ASTM A193 grado B7. Adicionalmente en la siguiente tabla se mostrarán los esfuerzos de fluencia del material indicado.

**Tabla 10:** *Esfuerzo de fluencia de pernos ASTM A193 grado B7 y B16*

Temperatura (°C)	B7 (MPa)	B16(MPa)
25	724	793
200	593	676
400	479	621

Para determinar el diámetro del anillo de los pernos de la junta bridada se hará uso de la tabla A del anexo 5, teniendo en consideración que para una primera aproximación se calculará en base del perno de anclaje de 2 y 1 ½” in.

Con ayuda de las ecuaciones (3.10 y 3.12) podremos hallar el momento total respecto al primer cuerpo del efecto, en donde h será igual a 3850 mm, esto debido a que el cordón de soldadura no puede estar cerca al cordón de soldadura de la junta bridada.

Previamente en la figura 31, se había calculado el momento máximo (en la base del efecto) y el momento en la costura inferior. Para el cálculo de los pernos bridados entre las juntas de los cuerpos, se hará el suso de los momentos en las costuras inferiores ( $M_{T1}$ ,  $M_{T2}$  y  $M_{T3}$ ), ya que estos valores representan la carga máxima que ejerce el viento en estas juntas.

Para el diseño de los pernos de anclaje, se seleccionarán pernos ASTM A193 grado B7. Se sabe que su esfuerzo de fluencia a una temperatura de 120 °C es  $S_B=650$  MPa. Aplicando un factor de seguridad de 2.7, el esfuerzo de diseño será de 240 MPa. Como una primera aproximación, utilizaremos la Tabla B del Anexo 4, que especifica el número máximo de pernos permitidos en función del diámetro del círculo de pernos.

De la tabla A (ver Anexo 6) se puede observar que el área de la raíz de un perno de 1 ½ " es 906 mm<sup>2</sup>; como el área calculada es menor al área del perno, se define que serán 18 pernos para la junta bridada con un diámetro de 1 ½"

#### 4.4.7.1. Espesor de junta bridada entre cuerpo I y II

Antes de calcular el espesor del anillo base; tener en consideración los datos calculados en los puntos anteriores. Adicionalmente, el valor de la constante K será igual en los 3 efectos, ya que en todos se utilizarán los mismos materiales. Dicho esto, se hará uso de la ecuación (3.24) para determinar la constante K, con el cual se podrá definir las demás constantes.

$$E_{A193 B7} = 200 \text{ GPa} \quad E_{AISI 304} = 193 \text{ GPa}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{S_{a-A193 B7}}{n f_{cb-AISI 304}}} = \frac{1}{1 + \frac{S_{a-A193 B7}}{\frac{E_{A193 B7}}{E_{AISI 304}} f_{cb-AISI 304}}}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{240000 \frac{kN}{m^2}}{\frac{200}{193} * 190000 \frac{kN}{m^2}}}$$

$$k = 0.45$$

Por lo tanto (Ver tabla D, Anexo 7),

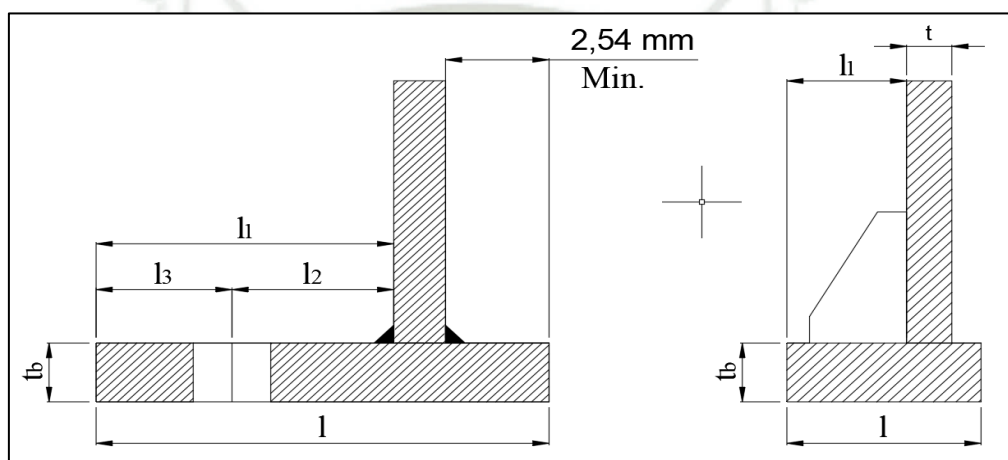
$$C_c = 1,884 \quad C_t = 2.113 \quad j = 0.785 \quad z = 0.404$$

Con las nuevas constantes determinada hallaremos la fuerza de tracción que se ejercer sobre las juntas bridadas entre los cuerpos I y II para esto haremos uso de la ecuación (3.25).

Una vez determinada la carga de tracción en las juntas bridadas, se puede calcular la fuerza de

compresión en el anillo de las juntas utilizando la ecuación (3.26). Posteriormente, con la carga de compresión definida, se calculará el esfuerzo de compresión sobre la junta bridada inferior. Cabe destacar que el anillo de las juntas bridadas sobresale hacia el interior de la coraza, lo que permite una unión adecuada entre ambos mediante cordones de soldadura. Como se indica en la Figura 38, esta distancia mínima es de 1" (25.4 mm); sin embargo, en nuestro caso, será de 1 ½" (38.1 mm). Con estas consideraciones, se aplicarán las ecuaciones (3.27 y 3.28).

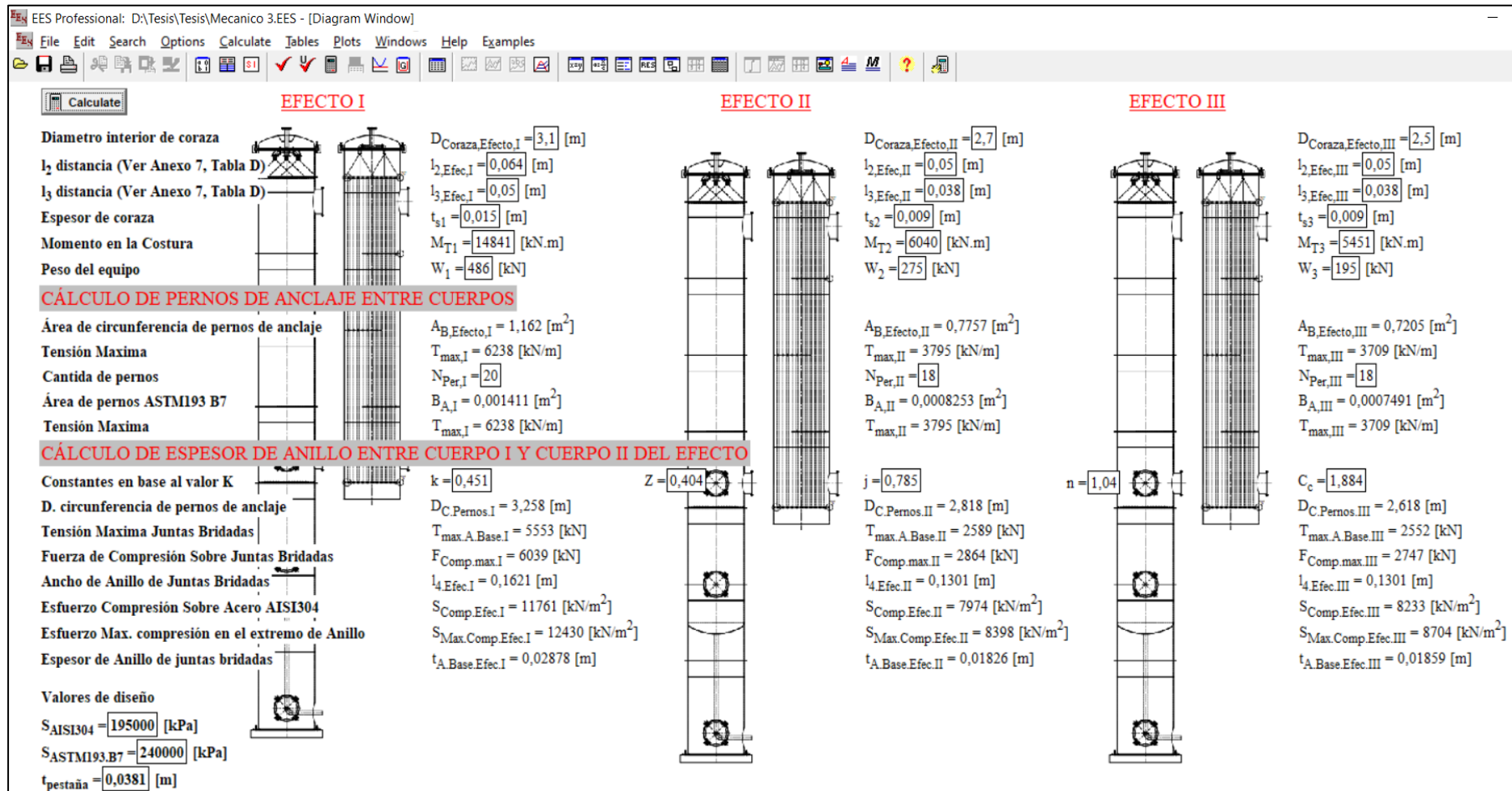
**Figura 38:** Esquema de ancho total de anillo base



*Nota: Recuperado de Eugene F. Megyesy /1989)*

Con el esfuerzo de compresión en la junta bridada inferior ya determinado, se podrá calcular el esfuerzo máximo, localizado en el extremo del anillo bridado, utilizando la ecuación (3.29). Finalmente, se calculará el espesor en los anillos de las juntas bridadas mediante la ecuación (3.30).

Figura 39: Cantidades de pernos de anclaje y espesores en juntas bridadas



El área de la raíz de un perno de 2" según la tabla A (ver Anexo 5) es de 1500 mm<sup>2</sup>, y para un perno de 1 ½", es de 835 mm<sup>2</sup>. Estos valores deben compararse con las áreas calculadas; si estas áreas son menores que las indicadas en las tablas, el valor se considera correcto. Como se muestra en la figura 39, se calcularon las áreas de los pernos de las juntas bridadas para los tres efectos. Los resultados obtenidos son: 20 pernos de anclaje ASTM 193 B7 de 2" para el primer efecto, 18 pernos de anclaje de 1 ½" para el efecto II y 18 pernos de anclaje de 1 ½" para el efecto III.

También se puede observar que en la Figura 39 como se puede observar el espesor calculado para las juntas bridadas del Efecto I es de 28.78 mm, para el Efecto II de 18.26 mm y para el Efecto III de 18.59 mm. De acuerdo con los valores previamente mencionados y lo establecido en la norma ASTM A240, el espesor normalizado para el Efecto I sería de 1 ¼" (31.75 mm), mientras que para los Efectos II y III, el espesor adecuado es de ¾" (19 mm).

#### 4.4.8. Cálculo de diámetro y espesor de ductor de vahos

La **tabla 11** proporciona las velocidades recomendadas para vapor, esenciales para dimensionar ductos de manera eficiente, minimizando pérdidas de presión, erosión y vibraciones.

**Tabla 11:** *Velocidades sugeridas para el flujo el vapor (m/s)*

Vapor	Triple Efecto		Cuádruple Efecto	
	Min	Max	Min	Max
<b>Vaporizador</b>	25	30	25	30
<b>1<sup>er</sup> Efecto</b>	30	35	30	35
<b>2<sup>do</sup> Efecto</b>	45	50	45	50
<b>3<sup>er</sup> Efecto</b>	60	80	60	80
<b>4<sup>to</sup> Efecto</b>	-	-	75	85

*Nota: Adaptado de Vodopivec et al. (2011)*

#### **4.4.8.1. Ducto de salida de vahos - efecto I**

Para el cálculo del diámetro del ducto haremos uso de los datos de la figura 29, tabla 7, así como las ecuaciones (3.31 y 3.32).

Para fines de cálculo se debe de tener en cuenta que los efectos se encuentran a una presión de vacío y basándonos en mediciones de campo, se tiene que la velocidad de los vahos es de 35 m/s.

#### **4.4.8.2. Ducto de salida de vahos - efecto II**

Para el caso de los ductos de vahos en el efecto II la velocidad de la salida de vahos será mayor, debido a que este se encuentra más cerca a la bomba de vacío y se tiene menos pérdidas por conexiones, así como distancia de recorrido. Adicionalmente las mediciones tomadas de campo, se tiene un promedio donde la velocidad de los vahos a las salidas del efecto II es de 50 m/s.

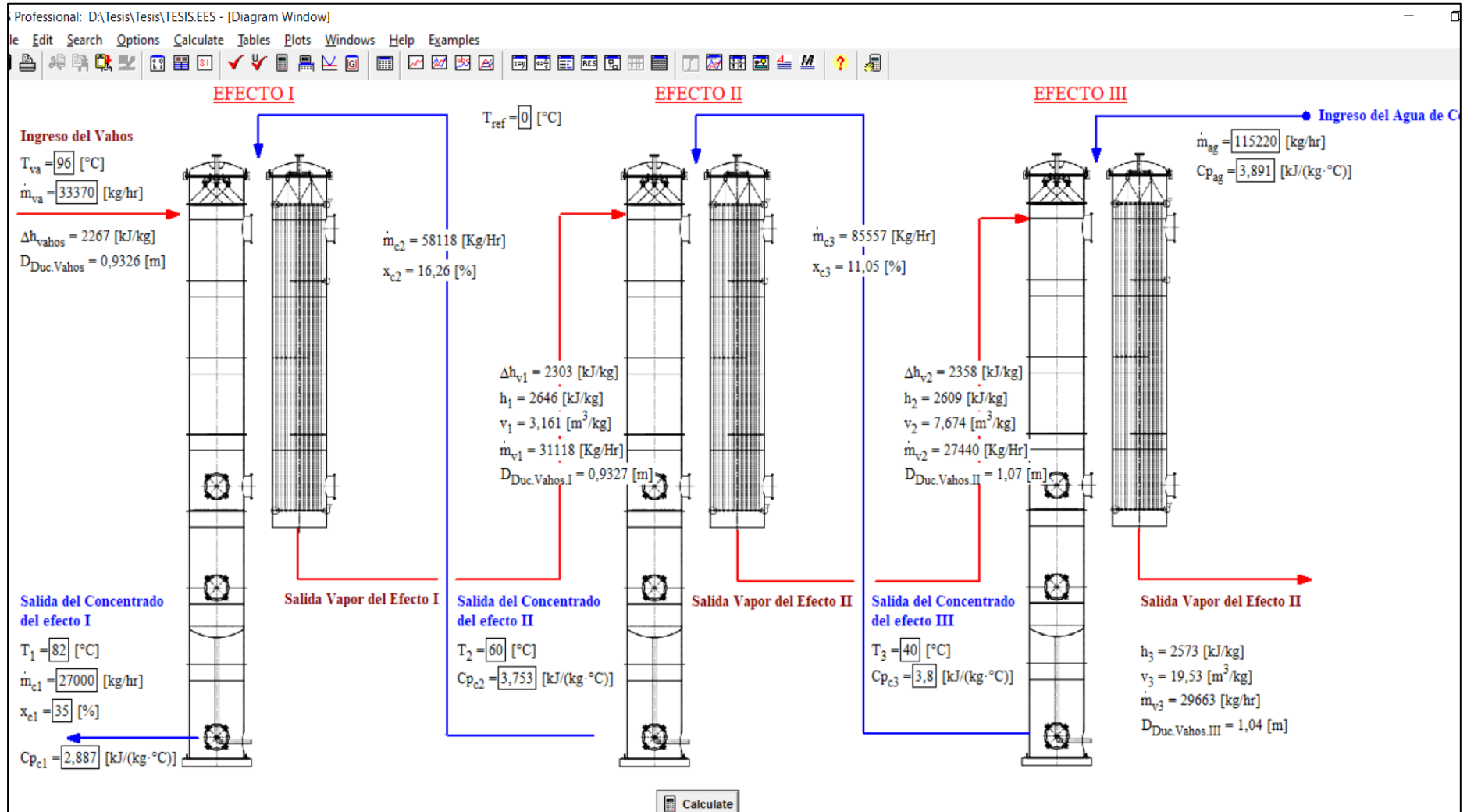
#### **4.4.8.3. Ducto de salida de vahos - efecto III**

En el caso del efecto III la velocidad se incrementa mucho más debido a que como se puede ver en su volumen específico por cada kilogramo de vapor se tiene 19.4 m<sup>3</sup> de vapor, ocupando una mayor cantidad de espacio en la cámara de vaporización dentro del efecto III, es por esto que se tiene que evacuar lo más rápido posible debido a que su permanencia en el efecto III causara un cambio de concentración en su producto de salida. Con lo antes mencionado y los datos tomados en campo se tiene que la velocidad de vapor de salida será de 80 m/s.

#### **4.4.8.4. Ducto de entrada de vahos - efecto I**

Para fines de cálculo y basándonos en mediciones de campo, se ha determinado que la velocidad de los vahos en este punto tiene un comportamiento muy similar al del vapor, con un rango de velocidad que varía entre 15 y 25 m/s.

Figura 40: *Diametro de ductos de vahos en los efectos*



Como se observa en la figura 40, los diámetros en los puntos de entrada y salida de cada uno de los efectos presentan variaciones significativas. Al ingreso del efecto I, se tiene un diámetro de 933 mm, manteniéndose constante a la salida con el mismo valor. En el caso del efecto II, el diámetro de salida incrementa a 1070 mm, mientras que en el efecto III alcanza los 1040 mm. Tras el cálculo de estos diámetros y conforme a los estándares establecidos para ductos, se ha determinado que el diámetro de entrada al efecto I será ajustado a 950 mm (38”), manteniéndose en 950 mm (38”) también a su salida. Para los efectos II y III, el diámetro adecuado en sus salidas es de 1100 mm (44”), asegurando un diseño conforme a las normas y que permita un flujo eficiente.

#### 4.4.8.5. Espesor de ductos

Para el espesor de los ductos se calculará con la ecuación (3.7), teniendo que:

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$t_{ductos} = \frac{150 \frac{kN}{m^2} * (0.94 m)}{190000 \frac{kN}{m^2} * 0.8 - 0.6 * 150 \frac{kN}{m^2}}$$

$$t_{ductos} = 0.94 mm$$

Según lo calculado deberíamos usar un espesor de 1 mm, pero por recomendaciones del manual de diseño de recipientes a presión se recomienda usar un espesor de 4.5 mm o 3/16 in; esto debido a factores de desgaste, peso del ducto, peso del fluido y tiempo de vida útil de los ductos.

#### 4.4.9. Cálculo de tuberías de circulación y alimentación

Para el cálculo del diámetro de las tuberías de circulación en los 3 efectos haremos uso de los datos la tabla 7, Anexo 10, así como las ecuaciones (3.32, 3.33 Y 3.34).

##### 4.4.9.1. Tubería de salida de concentrado – efecto I

El valor de la densidad del concentrado en el efecto I, II y III va a depender del porcentaje de concentración que se tiene; en el caso del efecto I su porcentaje de concentración

es del 35%. Con este grado Brix o de concentración se puede obtener la densidad del cualquier fluido con presencia de micro partículas sólidas. En la tabla del anexo 9 se puede observar estos valores. Para fines de cálculo y basándonos en mediciones de campo, se tiene que la velocidad del concentrado es de 0.7 m/s.

#### **4.4.9.2. Tuberías de recirculación – efecto I**

Para hallar la densidad del concentrado del efecto II se interpolará los datos de la tabla del anexo 9, teniendo en cuenta que su grado de concentración es de 16.31%. En el efecto 2 la velocidad el concentrado incrementa debido a que el grado de concentración se reduce, esto quiere decir que aún hay una cantidad considerable de agua presente, es por eso que la velocidad del concentrado es de 0.9 m/s.

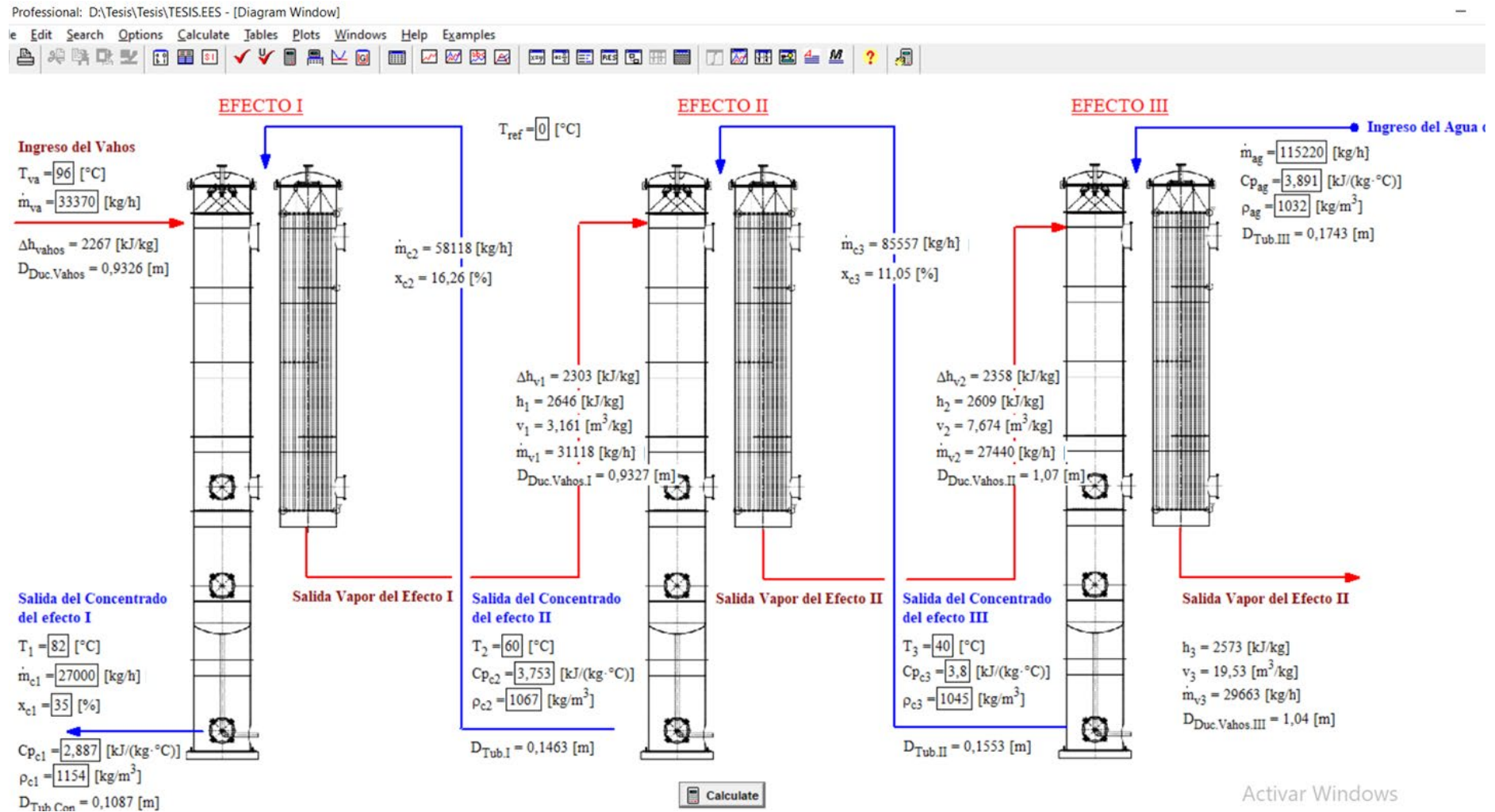
#### **4.4.9.3. Tuberías de recirculación – efecto II**

Al interpolar los datos de la tabla del anexo 9, y considerando un grado de concentración de 11.1%, se observa una tendencia de disminución en la densidad. Esto indica que el porcentaje de sólidos en comparación con el agua está disminuyendo. A medida que la concentración del fluido no ha alcanzado el nivel deseado, el contenido de agua sigue siendo considerablemente alto, lo que genera un incremento en la velocidad del concentrado. En este caso, la velocidad del concentrado es de 1.2 m/s, debido a la mayor cantidad de agua presente en el fluido.

#### **4.4.9.4. Tuberías de recirculación y alimentación– efecto III**

Al igual que en el efecto II se interpolará los datos de la tabla del anexo 9, teniendo en cuenta que su grado de concentración es de 8%. El agua de cola al contener una gran cantidad de partículas de agua dentro de su composición, su velocidad de desplazamiento es mayor a la de los demás efectos, por lo antes mencionado se tiene una velocidad de diseño de 1.3 m/s

Figura 41: *Diametro de tuberías de recirculación y alimentación*



Como se muestra en la figura 41, el diámetro del ducto de concentrado presenta variaciones en diferentes puntos del sistema. A la salida del efecto I, el diámetro es de 108.7 mm, mientras que en la alimentación al efecto I aumenta a 146.3 mm. Posteriormente, en la alimentación del efecto II, el diámetro incrementa a 155.3 mm, y finalmente, en la alimentación del efecto III, alcanza los 174 mm. Estas diferencias reflejan un diseño progresivo para acomodar los cambios en el flujo y la concentración del fluido en cada etapa del proceso. Con los antes mencionado el los diámetros normados serán los siguientes:

- Salida Efecto I: Con el diámetro de tubería calculado, se optó por hacer uso de una tubería DN125 SCH40, el cual cuenta con un diámetro interno 128 mm.
- Alimentación Efecto I: Con el diámetro de tubería calculado, se optó por hacer uso de una tubería DN150 SCH40, el cual cuenta con un diámetro interno 154 mm.
- Alimentación Efecto II: Con el diámetro de tubería calculado, se optó por hacer uso de una tubería DN200 SCH40, el cual cuenta con un diámetro interno 200 mm.
- Alimentación Efecto III: Con el diámetro de tubería calculado, se optó por hacer uso de una tubería DN200 SCH40, el cual cuenta con un diámetro interno 200 mm.

Los datos calculados, nos ayudaran para el dimensionamiento de nuestros sistemas de bombeo en los efectos, cabe indicar que el material con el trabajara será con acero Inox Aisi 304.

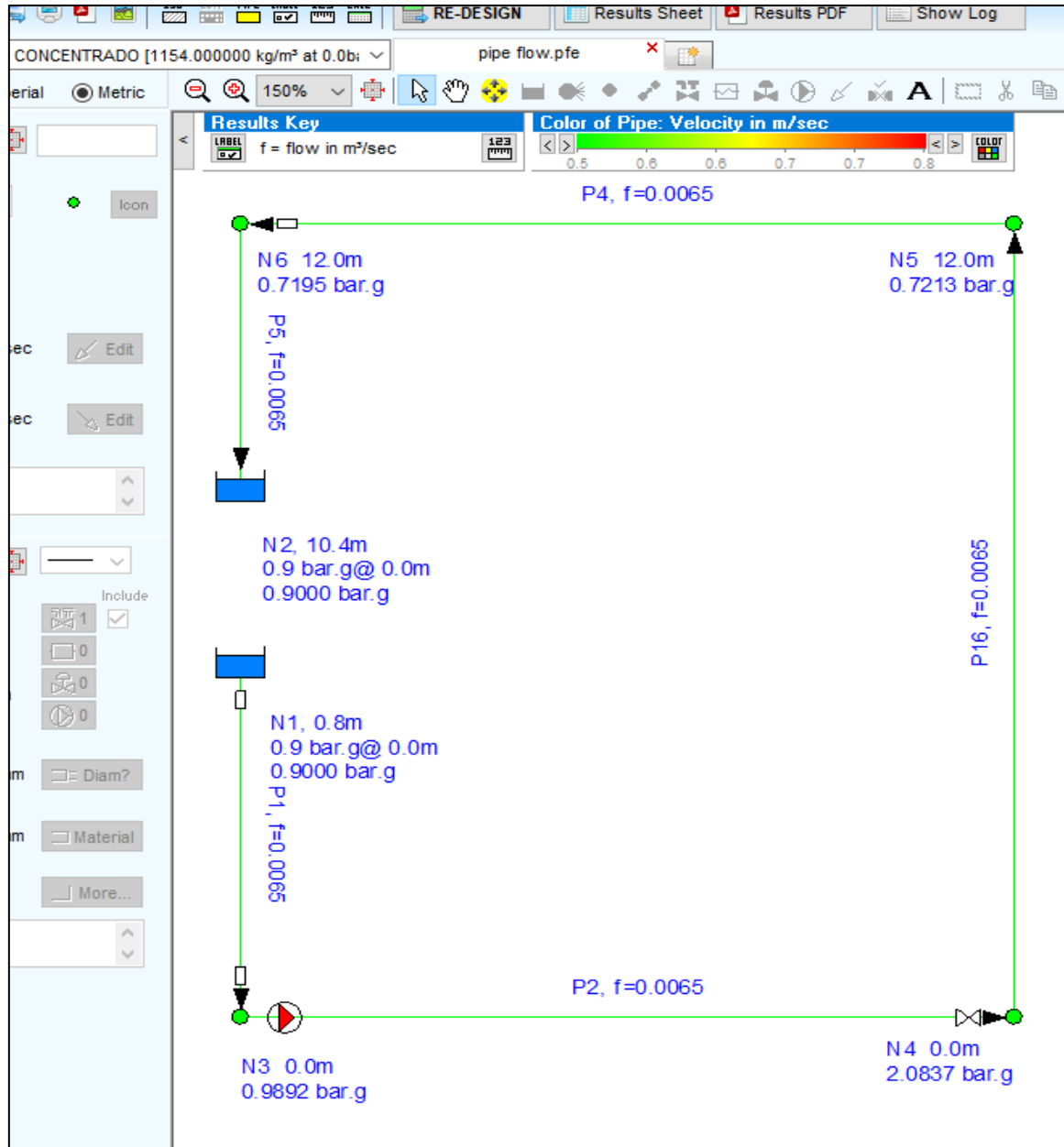
#### **4.4.10. Selección de bomba para sistema de bombeo en efectos**

##### **Paso 1**

Para el paso 1 haremos uso del Software Pipe Flow, el cual nos ayudara a calcular a altura dinámica total de nuestro sistema de bombeo en los 03 efectos. Con el software Pipe Flow podremos calcular las perdidas por fricción, perdidas por accesorios, velocidades a lo largo de la tubería, etc. Este cálculo es fundamental para la correcta selección de la bomba, asegurando que el equipo elegido sea capaz de satisfacer las necesidades específicas del sistema

en términos de altura y caudal. Cabe mencionar que para el presente trabajo se hizo uso de la versión 7.40.

**Figura 42:** Diagrama de simulación en Pipe Flow



Se presenta la Tabla 11, que adjunta las alturas dinámicas de bombeo de los 3 efectos. También, se puede observar que los valores de pérdidas de fricción son despreciables; esto debido las tuberías de acero inoxidable presentan una rugosidad mucho menor a tuberías de acero al carbono.

**Tabla 12:** Datos calculados por el Software Pipe Flow

Fluido	Material	Diámetro	Longitud	Caudal	Velocidad	Fricción	ADT
		Interior					(+)
		mm	m	m <sup>3</sup> /s	m/s	m.hd	m.hd
Salida de concentrado Efecto I	125 mm Stainless Steel Sch. 40S	128.194	0.8	0.0065	0.604	0.003	
	125 mm Stainless Steel Sch. 40S	128.194	12	0.0065	0.604	0.039	
	125 mm Stainless Steel Sch. 40S	128.194	4	0.0065	0.604	0.013	13.583
	125 mm Stainless Steel Sch. 40S	128.194	4	0.0065	0.504	0.013	
	125 mm Stainless Steel Sch. 40S	128.194	1.6	0.0065	0.504	0.005	
Recirculación de concentrado Efecto I	150 mm Stainless Steel Sch. 40S	154.051	1.6	0.015	0.805	0.009	
	150 mm Stainless Steel Sch. 40S	154.051	0.8	0.015	0.805	0.005	
	150 mm Stainless Steel Sch. 40S	154.051	4	0.015	0.805	0.023	14.223
	150 mm Stainless Steel Sch. 40S	154.051	12	0.015	0.805	0.07	
	150 mm Stainless Steel Sch. 40S	154.051	4	0.015	0.805	0.023	
Recirculación de concentrado Efecto II	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	0.8	0.023	1.000	0.003	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	4	0.023	1.000	0.013	11.402
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	12	0.023	1.000	0.04	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	4	0.023	1.000	0.013	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	1.6	0.023	1.000	0.005	
Recirculación y alimentación en Efecto III	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	0.8	0.031	1.215	0.004	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	4	0.031	1.215	0.020	11.105
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	12	0.031	1.215	0.059	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	4	0.031	1.215	0.020	
	200 mm Stainless Steel Sch. 40S	202.717	1.6	0.031	1.215	0.008	

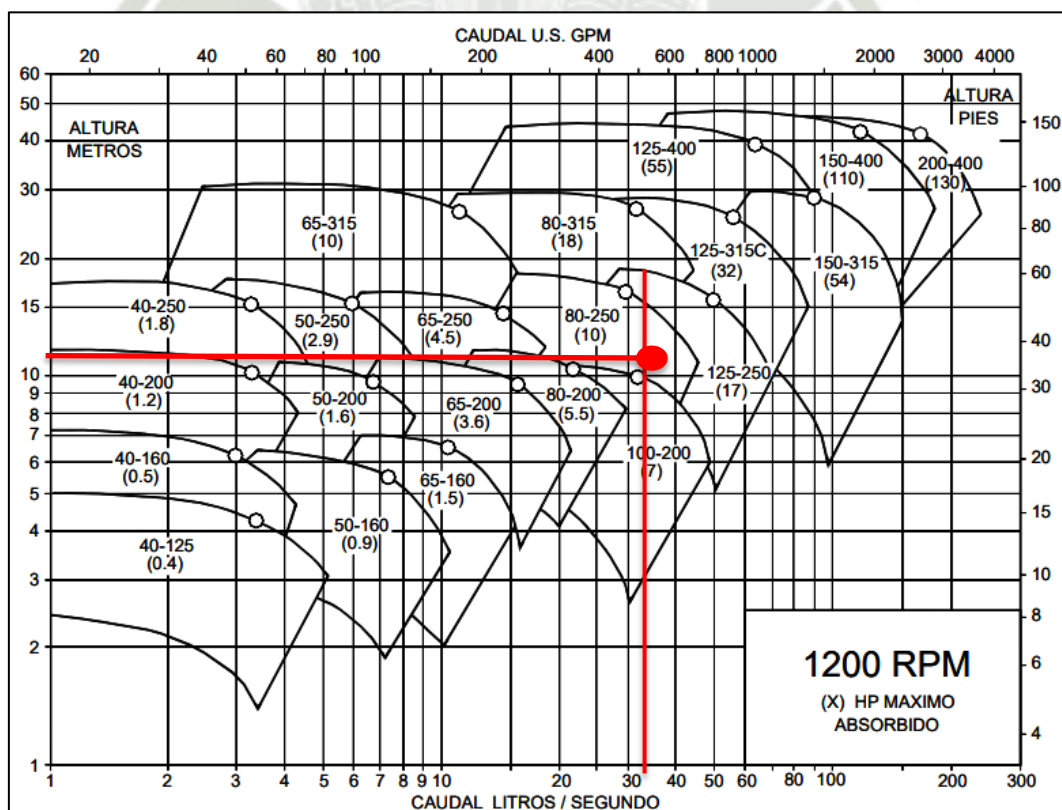
De la tabla 12 se tiene que:

- Salida de concentrado Efecto I: ADT = 13.583 m; Q = 0.0065 m<sup>3</sup>/s
- Recirculación Efecto I: ADT = 14.223 m; Q = 0.015 m<sup>3</sup>/s
- Recirculación Efecto II: ADT = 11.402 m; Q = 0.023 m<sup>3</sup>/s
- Recirculación y alimentación Efecto III: ADT = 11.105 m; Q = 0.031 m<sup>3</sup>/s

## Paso 2

Para seleccionar la bomba adecuada, utilizaremos el caudal y la altura dinámica total (ADT) como parámetros clave. Con esta información, procederemos a analizar el abanico de curvas de operación de las bombas de la empresa Hidrostral, lo que nos permitirá determinar las características técnicas y operacionales de la bomba más adecuada para nuestras necesidades. Como parte de este estudio, realizaremos un ejemplo práctico utilizando los datos correspondientes al efecto III y la recirculación.

**Figura 43:** *Abanico de bombas por tamaño de impulsor*

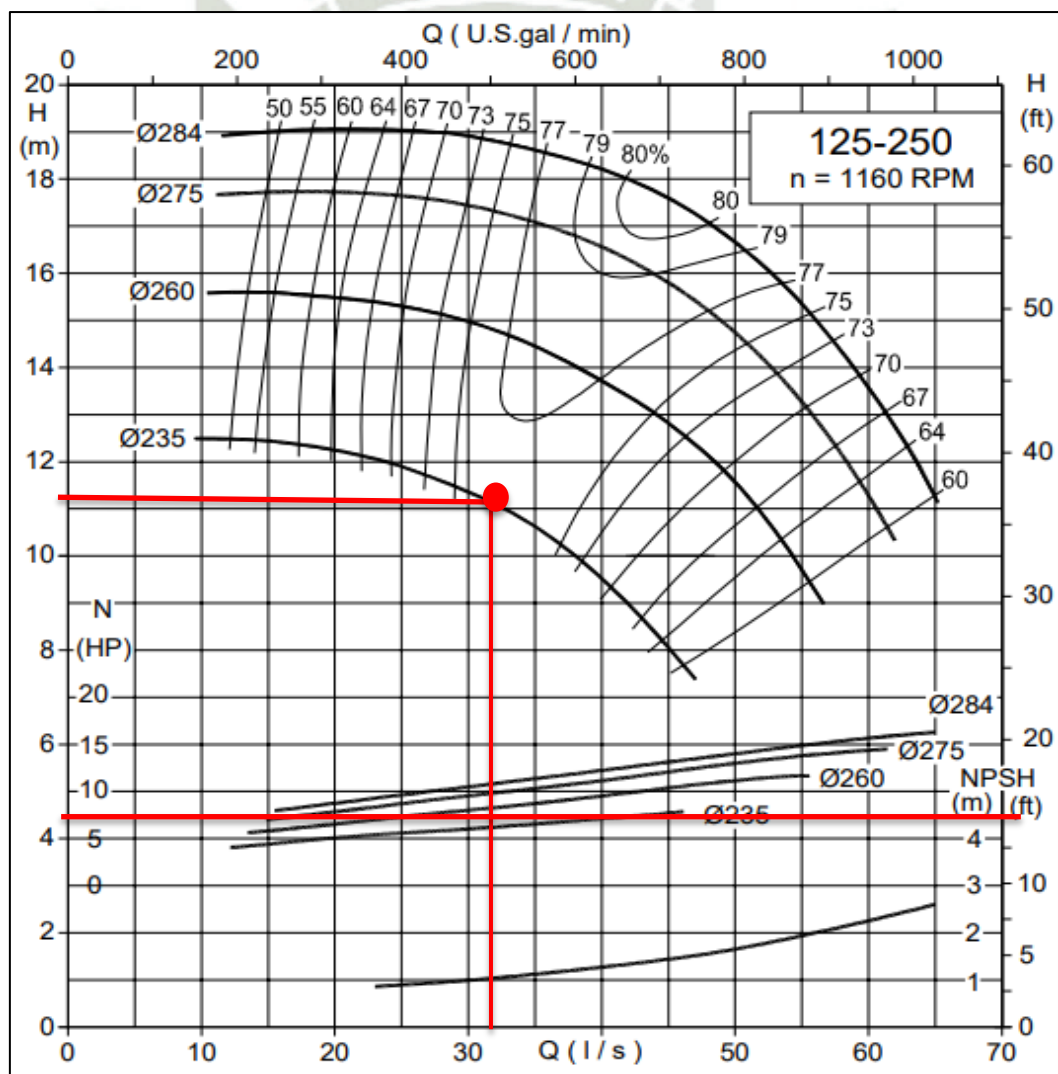


Nota: Recuperado de Hidrostral (2015)

**Paso 3**

Como se muestra en la figura 50, la bomba más adecuada es aquella con un impulsor de aproximadamente 250 mm y una descarga de 80 mm. Sin embargo, dado que el diámetro de la descarga es significativamente menor que el diámetro de nuestras tuberías, lo que podría generar pérdidas por el estrechamiento del flujo, la mejor opción es optar por el modelo que sigue a la bomba recomendada según la gráfica. Para confirmar que la bomba 125–250 es la opción más adecuada, se procederá a analizar su curva de operación.

**Figura 44:** Curva de operación de la bomba ISO 2858 modelo 125-250



*Nota: Recuperado de Hidrostral (2015)*

Como se observa en la curva de operación, con una ADT de 11.05 m, la bomba proporcionaría un caudal de 0.0325 m<sup>3</sup>/s, que supera las necesidades de nuestro sistema y

cumple con los requisitos operacionales establecidos. Con la curva también se puede saber potencia del motor eléctrico que estaría necesitando la bomba para su correcto funcionamiento.

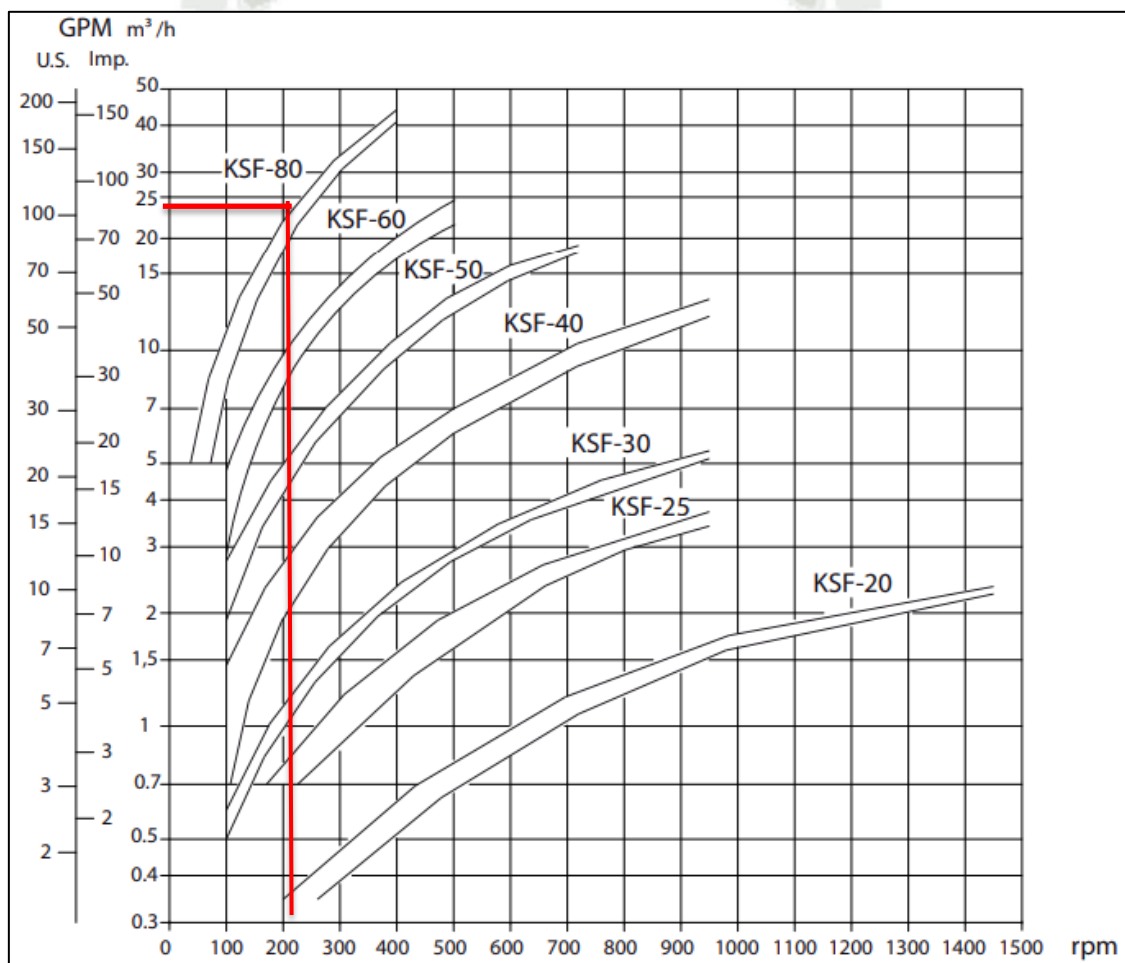
**Tabla 13:** *Características técnicas de la bomba y motor eléctrico para el efecto III*

<b>Datos Técnicos De La Bomba ISO 2858</b>	
<b>Modelo de la bomba</b>	125 - 250
<b>Caudal</b>	45 Lt/s
<b>ADT</b>	12.5 m
<b>RPM</b>	1160
<b>Diámetro de impulsor</b>	235 mm
<b>Diámetro de salida</b>	125 mm
<b>Ejecución metalúrgica</b>	AISI - 316
<b>Motor</b>	Weg
<b>Fase</b>	Trifásica
<b># de polos</b>	6 p
<b>Protección</b>	IP 57
<b>RPM</b>	1200
<b>HP</b>	10
<b>FP</b>	0.76
<b>Voltaje</b>	220/440 V

Al repetir los pasos 2 y 3 para la selección de las bombas en los efectos I y II, se confirma que las bombas necesarias son idénticas a las seleccionadas para el efecto III, con la única diferencia en la potencia del motor eléctrico. Además, en el caso de la bomba de recirculación para el primer efecto, será necesario ajustar tanto el motor como el tamaño del impeler, pasando de 235 mm a un impeler de 250 mm. Esta unificación en las características técnicas permitirá estandarizar las cuatro bombas, lo que facilitará tanto la operación como el mantenimiento, optimizando la gestión de repuestos y reduciendo los tiempos de parada por intervenciones técnicas.

Para la selección de la bomba en la salida del efecto I; donde ya se encuentra el producto final, se optará por una bomba de tornillo excéntrico, ya que una bomba centrífuga no sería adecuada debido a la relación agua/sólido. La bomba de tornillo excéntrico es más eficiente para manejar fluidos con alta viscosidad y contenido de sólidos, asegurando un transporte suave y sin alterar la integridad del producto.

**Figura 45:** *Curva de operación de bomba de tornillo excéntrico*

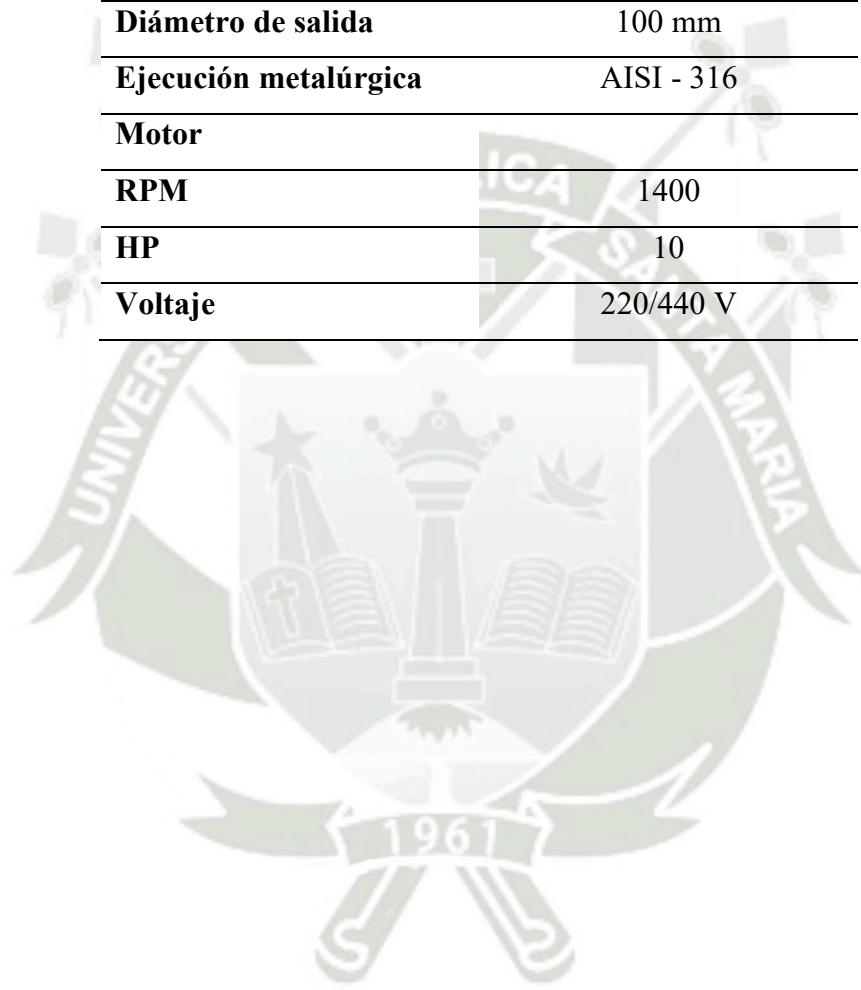


*Nota: Recuperado de Inoxpa (2017)*

Para la selección de la bomba de tornillo excéntrico se debe tener en cuenta el caudal que en nuestro caso será de 23.4 m³/h (0.0065 m³/s), y proyectando el caudal sobre la curva próxima a nuestro requerimiento se puede observar en la curva de operación el modelo adecuado sería la bomba tornillo KSF-80 a 200 RPM. En la tabla 14, se mencionan las características técnicas de la bomba de tornilla seleccionada.

**Tabla 14:** *Características técnicas de la bomba a la salida del efecto I*

<b>Datos Técnicos De La Bomba De Tornillo Excéntrica</b>	
<b>Modelo de la bomba</b>	KSF - 80
<b>Caudal</b>	45 m <sup>3</sup> /h
<b>ADT</b>	6 bar / 60 mca
<b>RPM</b>	200
<b>Diámetro de salida</b>	100 mm
<b>Ejecución metalúrgica</b>	AISI - 316
<b>Motor</b>	
<b>RPM</b>	1400
<b>HP</b>	10
<b>Voltaje</b>	220/440 V



## CAPÍTULO V.

### 5. RESULTADOS

#### 5.1. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

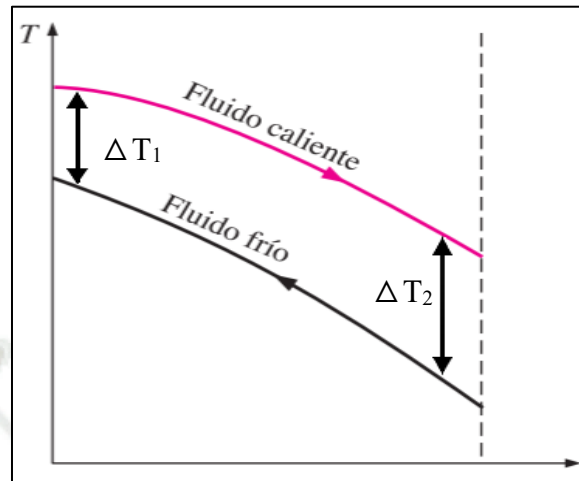
##### 5.1.1. Análisis termodinámico de los efectos

En el diseño termodinámico inicial de los efectos, se tuvieron valores reales que normalmente se presentan en las operaciones de la planta de estudio. Para efectos de análisis se realizarán simulaciones en el programa EES, en donde en la tabla 15 se puede observar estos resultados. Para esta simulación se varió las temperaturas de ingreso y permanencia en cada uno de los efectos.

**Tabla 15:** *Variación de áreas de transferencia con respecto a las temperaturas*

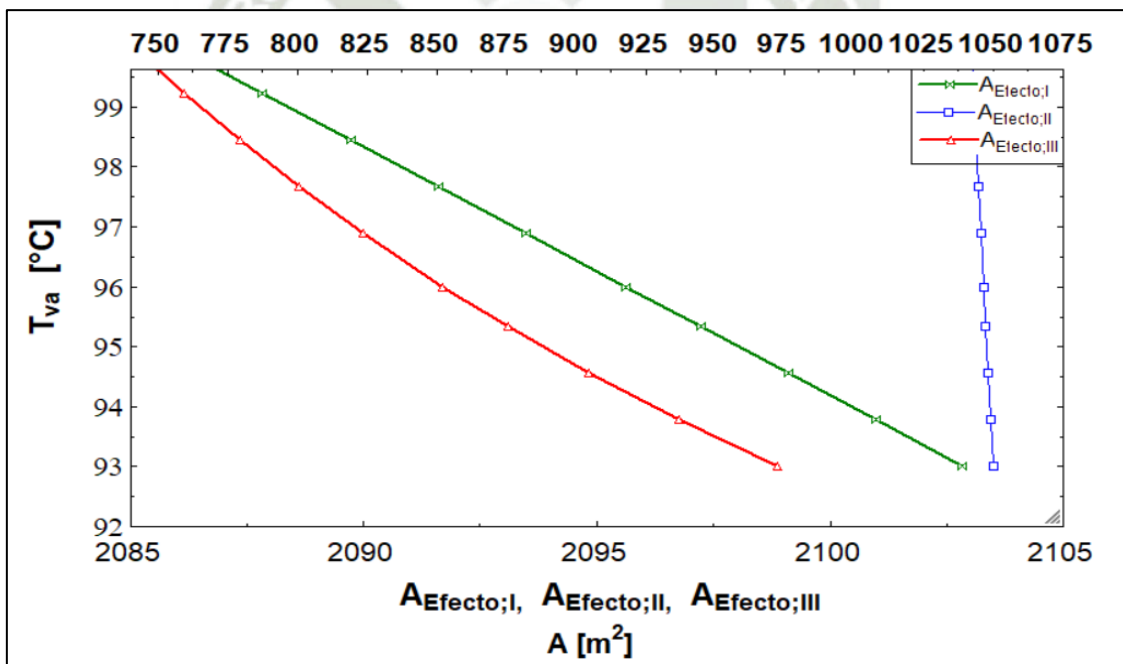
$T_{va}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	Área Efecto I	Área Efecto II	Área Efecto III
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
<b>100</b>	86	64	44	2085,9	1042	740,6
<b>99,22</b>	85,22	63,22	43,22	2087,8	1043	759,3
<b>98,44</b>	84,44	62,44	42,44	2089,7	1044	779,2
<b>97,67</b>	83,67	61,67	41,67	2091,6	1045	800,6
<b>96,89</b>	82,89	60,89	40,89	2093,5	1045	823,6
<b>96</b>	82	60	40	2095,6	1046	852,2
<b>95,33</b>	81,33	59,33	39,33	2097,2	1047	875,4
<b>94,56</b>	80,56	58,56	38,56	2099,1	1048	904,8
<b>93,78</b>	79,78	57,78	37,78	2101	1049	937
<b>93</b>	79	57	37	2102,8	1050	972,6

**Figura 46:** *Delta de temperaturas a contraflujo*



*Nota: Recuperado de Cengel & Ghajar et al. (2011)*

**Figura 47:** *Variación de las áreas de trasferencias*

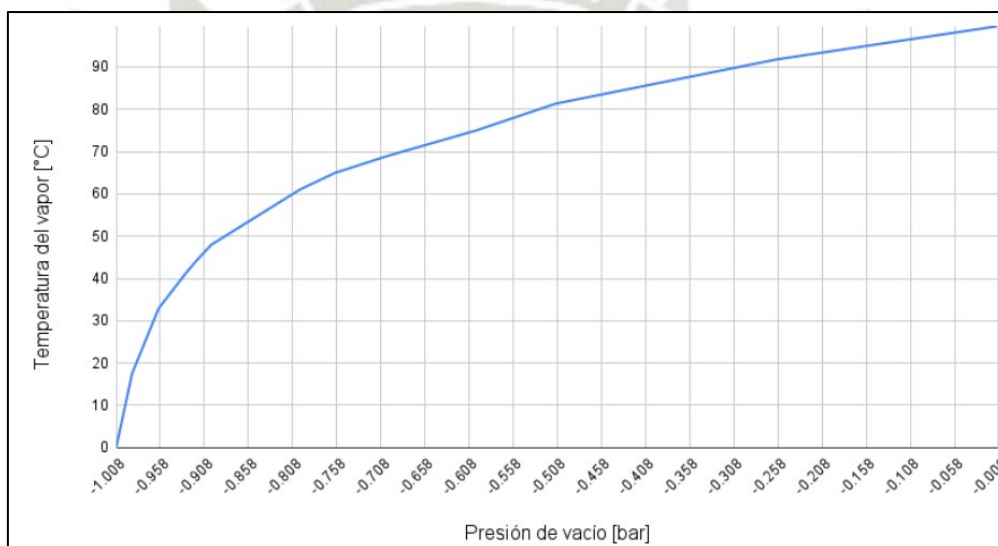


Con los datos obtenidos en la tabla 14 se pudo graficar la figura 47, en donde se puede observar cómo influyen los deltas de temperatura de la figura 46 en las áreas de transferencia. Esto nos indica que, a medida que las temperaturas del fluido caliente disminuyen, se requiere un área de transferencia de calor mayor para mantener el mismo nivel de intercambio térmico. Es importante destacar que, al aumentar el área de transferencia térmica, se incrementa la cantidad de tubos por efecto, así como las dimensiones de cada efecto. Por este motivo, antes

de proceder con los cálculos mecánicos, se ha considerado un factor de seguridad de 1.15 en las áreas de transferencia. Esto tiene como objetivo asegurar que, una vez en operación, el equipo pueda funcionar con normalidad ante posibles variaciones en la temperatura de ingreso de los vahos.

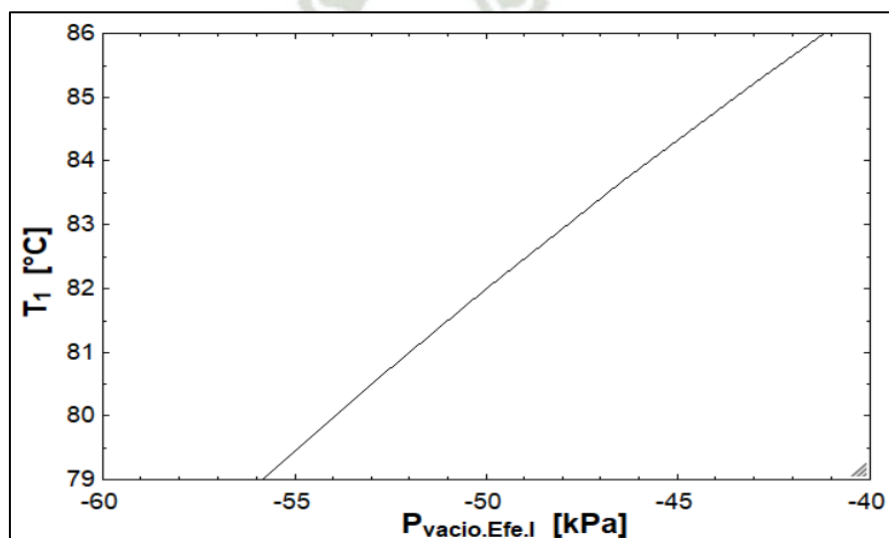
Es importante considerar que las variaciones de temperatura en cada uno de los efectos también influirán en la presión de vacío requerida en cada etapa del proceso. Esto lo podemos observar en la figura 48.

**Figura 48:** *Temperatura de vapor Vs Presión de vacío*

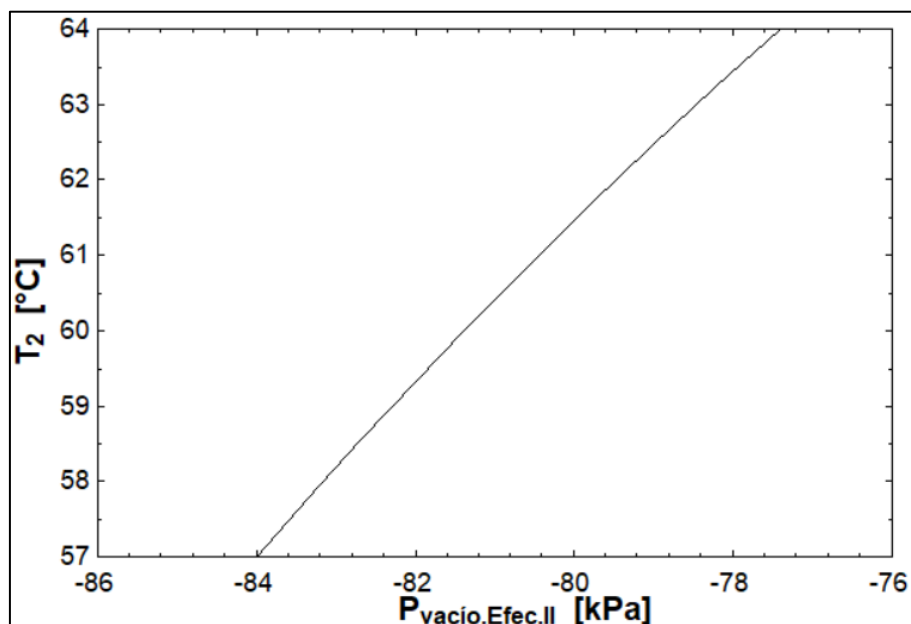


*Nota: Recuperado de Domancic et al. (2022)*

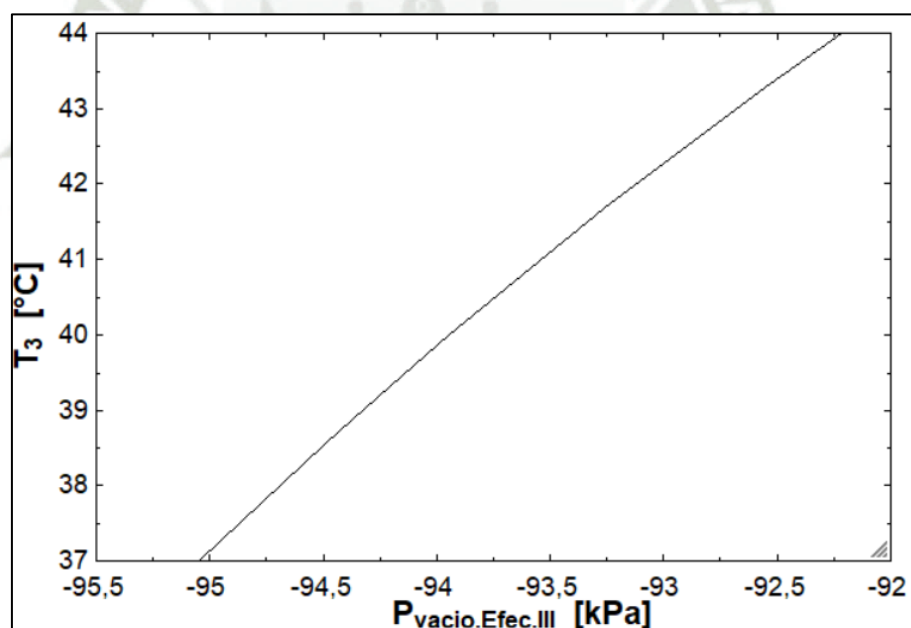
**Figura 49:** *Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto I*



**Figura 50:** *Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto II*



**Figura 51:** *Temperatura de vapor Vs Presión de vacío efecto II*



Como se observa en las figuras 49, 50 y 51, la presión de vacío aumenta a medida que disminuye la temperatura de evaporación. Además, se puede notar que el efecto III presenta la mayor presión de vacío, mientras que el efecto I tiene la menor. Esto es crucial para la selección de la bomba de vacío, ya que la presión de diseño debe basarse en la del efecto III, que es la más alta, estableciendo así una presión final de diseño de 2,2.

Continuando con nuestro análisis, en la tabla 16 podemos observar valores de evaporación extraídos de otras plantas, con la finalidad de hacer una comparativa.

**Tabla 16:** *Datos de relación de concentración (R. C) en 02 plantas diferentes*

IT	Agua de cola (m3/h)	Concen (m3/h)	Q evap. (m3/h)	R. C	Agua de cola (TM/h)	Concen (TM/h)	Q evap. (TM/)	R. C
01	21,67	5,42	16,25	4,00	42,11	10,03	16,25	4,20
02	29,67	5,67	24,00	5,23	43,72	10,75	24,00	4,07
03	27,08	5,83	21,25	4,64	49,29	10,85	21,25	4,54
04	29,33	5,83	23,50	5,03	45,98	9,54	23,50	4,82
05	20,00	3,80	16,20	5,26	43,98	9,60	16,20	4,58
06	24,67	5,17	19,50	4,77	39,40	6,40	19,50	6,16
07	42,67	6,67	35,00	6,40	41,07	8,00	35,00	5,13
08	41,83	6,17	35,67	6,78	26,92	6,32	35,67	4,26
09	38,13	8,12	30,01	4,70	35,30	7,98	30,01	4,42
10	34,25	7,33	26,92	4,67	26,37	5,85	26,92	4,51
11	40,75	8,75	32,00	4,66	30,90	6,85	32,00	4,51
12	20,67	4,50	16,17	4,59	32,97	7,52	16,17	4,38
13	29,33	6,17	23,17	4,75	35,20	6,68	23,17	5,27
14	26,08	7,00	19,08	3,73	35,61	7,27	19,08	4,90
	<b>Promedio</b>			4,99	<b>Promedio</b>			4,72

*Nota: Adaptado de (Zapata, 2022)*

Como se observa en la Tabla 16, se han tomado valores reales de dos plantas diferentes, las cuales presentan capacidades de producción distintas. Los valores promedio de concentración para estas plantas son de 4,99 y 4,72, mientras que el valor correspondiente a nuestra planta diseñada es de 4,27. Este último valor es bastante conservador, considerando los diversos factores de diseño que se han tenido en cuenta.

### 5.1.2. Análisis de componentes mecánicos calculados

Para estudiar y validar los resultados obtenidos, se utilizarán los softwares Inventor 2025 y ANSYS 2024 R2. Inventor 2025 se empleará para modelar los tres efectos debido a su

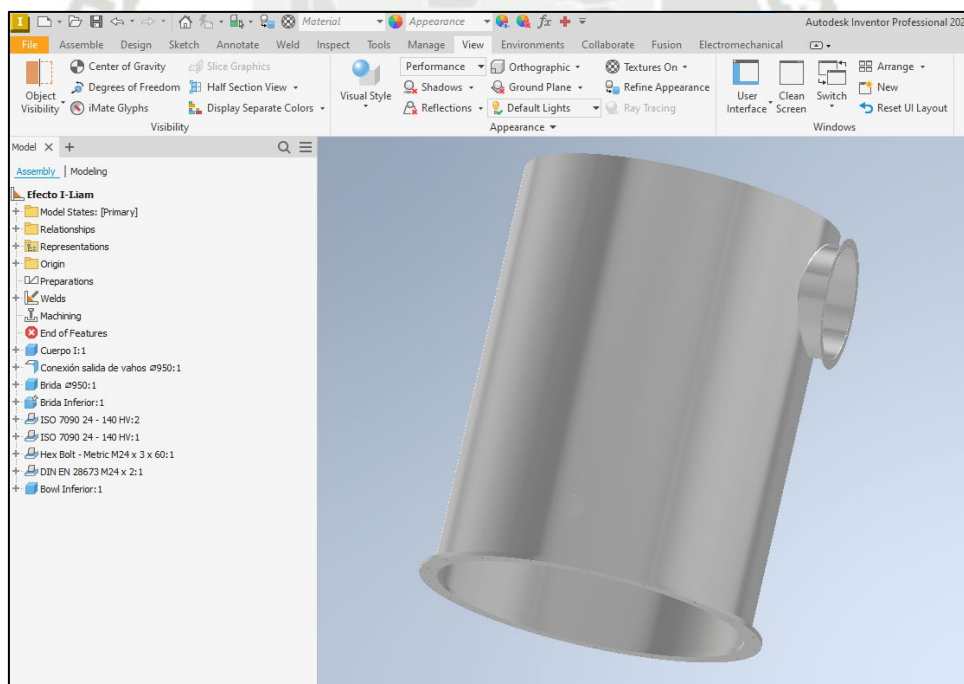
robustez en este ámbito. Posteriormente, se realizará el análisis de esfuerzos utilizando ANSYS, aprovechando su capacidad avanzada para el mallado y el análisis por elementos finitos (L. Rodríguez & García et al., 2016).

Nos centraremos en analizar el esfuerzo máximo, deformación y el factor de seguridad de los componentes diseñados. Para simplificar las pruebas por elementos finitos considerando los tres efectos, se ha decidido enfocar el estudio en el efecto #2. En este caso por la limitación de la licencia del software el estudio se realizará a 05 componentes críticos operacionales del efecto I, estos son: el anillo base, cuerpo I, pernos de anclaje, Bowl inferior y espejos fijos.

Es importante destacar que los planos de ensamblaje y despiece de los componentes modelados están incluidos en los anexos.

### 5.1.2.1. Análisis de anillo base y cuerpo I

**Figura 52:** *Modelado de ensamblaje Anillo Base – Cuerpo I*

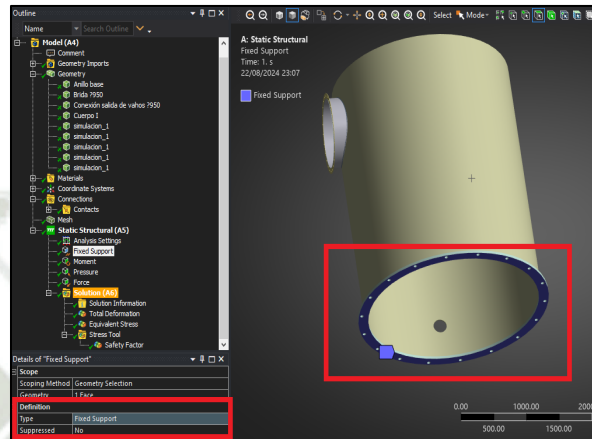


#### Paso 1

Antes de iniciar la simulación en el Software ANSYS se deberá de configurar los puntos que se encontraran fijados en el ensamblaje a analizar, la cual en nuestro caso estará ubicada en

la parte inferior del anillo base, ya que estará fijado al concreto a través de pernos de anclaje. Esto se puede observar en la figura 53.

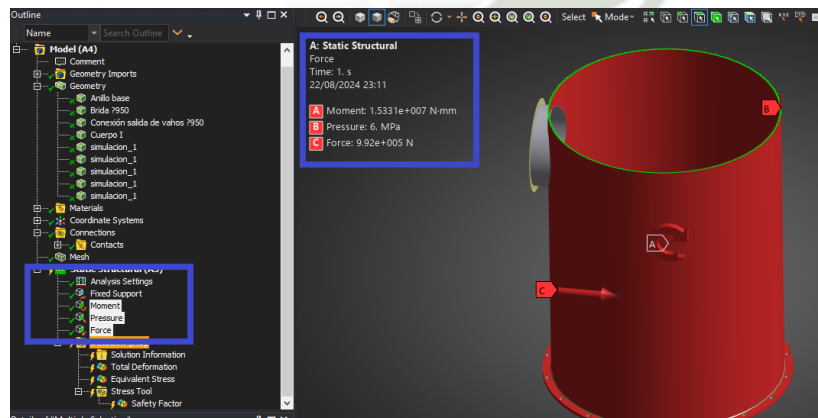
**Figura 53:** *Punto fijo en anillo base de efecto I*



### Paso 2

Una vez configurado nuestro punto fijo, procederemos a colocar todas las cargas, momentos y centro de gravedad de nuestro sólido a analizar para esto previamente tendremos que identificar las superficies y centros de gravedad. Tener en cuenta que el programa Ansys nos permite configurar las coordenadas.

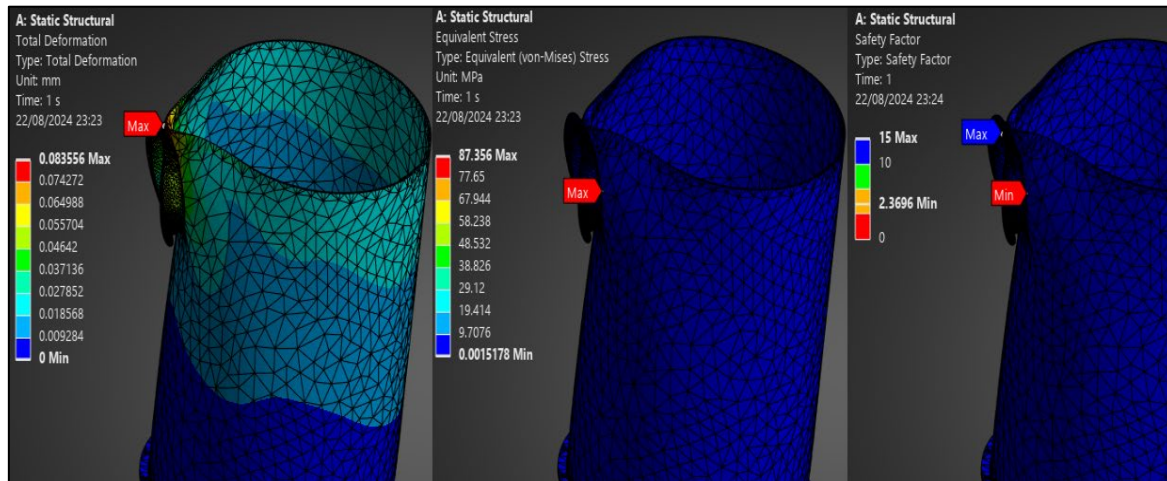
**Figura 54:** *Configuración de cargas en el ensamble*



### Paso 3

Una vez realizado y verificado que las cargas calculadas en el capítulo anterior se han programado de manera adecuada, procederemos a ejecutar la simulación del máximo esfuerzo, deformaciones y factor de seguridad (F.S).

**Figura 55:** *Factor de seguridad y máxima deformación del cuerpo I*

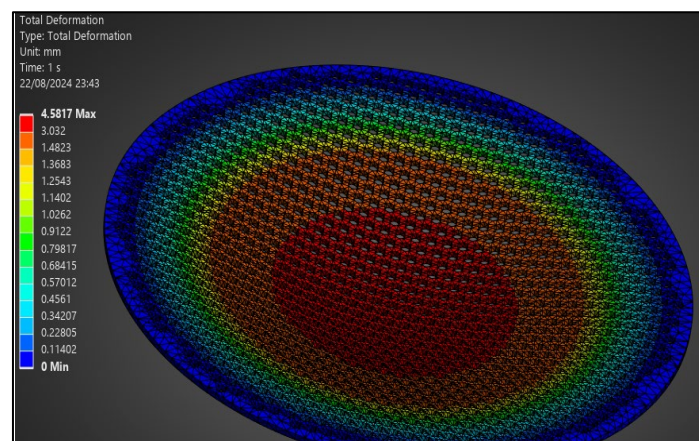


Como se observa en la figura 55, la deformación máxima del Cuerpo I y del anillo base es de 0.08351 mm. En cuanto al factor de seguridad, se obtuvo un valor máximo de 15 y un mínimo de 2.36, ambos superando el umbral requerido. Estos resultados indican que los cálculos realizados son adecuados para el correcto funcionamiento de la planta de evaporación. Además, el factor de seguridad refleja una margen considerable ante posibles variaciones en las condiciones de diseño, ya sea por factores naturales o fallos en el proceso de producción.

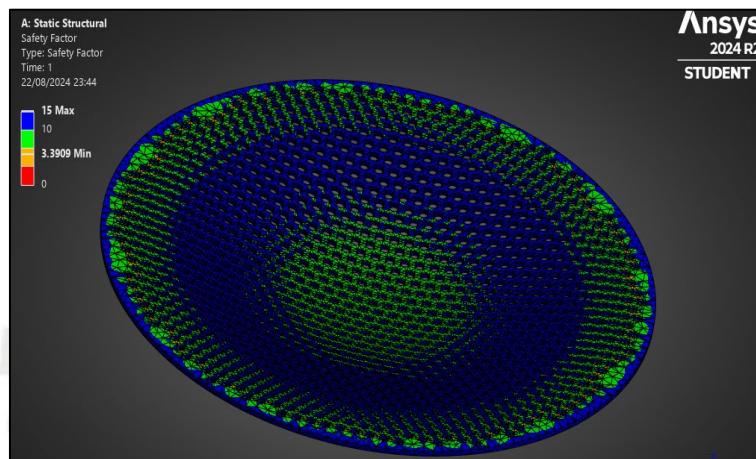
### 5.1.2.2. Análisis de espejo fijo

Para el análisis del espejo fijo se seguirán los pasos que para el análisis del cuerpo I, en donde se tendrá como punto fijo el contorno lateral y como única carga se tendrá el peso de los tubos.

**Figura 56:** *Deformación máxima de espejo fijo*



**Figura 57:** *Factor de seguridad de espejo fijo*

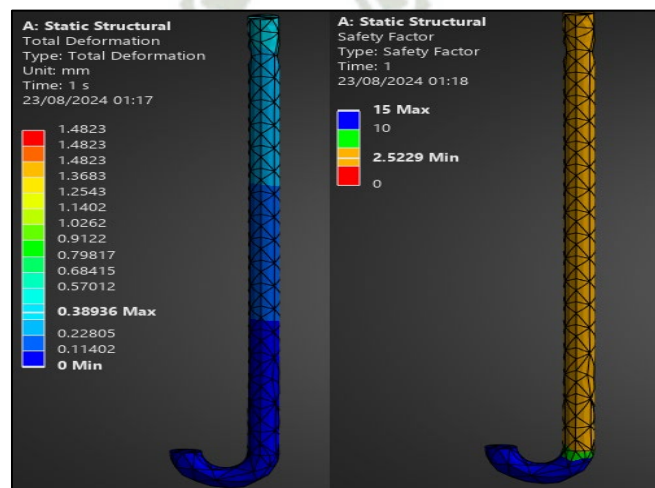


En las figuras 56 y 57, se observa una deformación máxima de 4.6 mm y un factor de seguridad de 3.30, lo que confirma que los espesores seleccionados y la distribución de los agujeros son óptimos. Estos resultados validan la precisión de los cálculos realizados, garantizando que el diseño cumple con los requisitos necesarios para un desempeño confiable, especialmente ante posibles variaciones en las condiciones del proceso de producción.

### 5.1.2.3. Análisis de pernos de anclaje

Para el análisis de los pernos de anclaje en carga se deben considerar la configuración o habilitación de las propiedades mecánicas del material ASTM 193 B16, ya que estos como tal no se encuentran en la base de datos del programa Ansys.

**Figura 58:** *Deformación máxima y factor de seguridad en pernos de anclaje*



Para concluir la validación de los resultados, la figura 58 muestra que los valores obtenidos en los cálculos mecánicos de los pernos de anclaje son adecuados, con un factor de seguridad (F.S) mínimo de 2.52 y una deformación máxima de 0.39 mm, ambos valores satisfactorios para este componente crítico. Es importante destacar que durante el diseño de estos pernos se tomaron en cuenta consideraciones específicas que aumentan su factor de seguridad. Los resultados de las simulaciones confirman que los pernos podrán soportar las cargas de diseño, así como posibles variaciones en las condiciones operativas.



## 6. CONCLUSIONES

- Se analizó el flujo de materia y energía en la planta de producción de harina de 180 TM/h, desde la recepción de materia prima hasta el almacenamiento de la misma. Con el análisis en mención de la planta de harina se obtuvieron los valores de diseño tanto del flujo de materia prima en la alimentación (115,220 TM/h), como el flujo de concentración en la salida (27,00 TM/h) de la planta de evaporación de agua de cola.
- Se desarrollo el modelamiento termodinámico planta de evaporación haciendo uso del programa EES. En donde se pudieron calcular el área de transferencia, flujos masicos de la materia, flujos masicos del vapor y caudales volumétricos en los Efectos I, II, así como en el efecto III.
- Se realizó el diseño mecánico de la planta de evaporación utilizando el software EES. A través de este, se calcularon los espesores de los dos cuerpos principales, los espejos fijos, el anillo base y los anillos bridados. Asimismo, se llevó a cabo el dimensionamiento de los pernos de anclaje y de unión para los tres efectos de la planta de evaporación.
- Se modelaron los isométricos en el software Inventor 2025 y se analizaron los componentes mecánicos mediante mallas en el software Ansys 2024. Los análisis arrojaron un factor de seguridad promedio superior a 2.3, lo que permite concluir que los componentes calculados son óptimos para el funcionamiento de cada uno de los efectos de la planta de evaporación.
- En los resultados, se pudo observar que las gráficas simuladas de Temperatura de alimentación VS Área de transferencia de nuestra planta de evaporación, poseen un comportamiento similar al de las curvas características de un intercambiador de calor. Además, se comprobó que la relación de concentración obtenida (4.27) se encuentra dentro de los rangos observados en dos plantas de referencia consultadas.

## 7. RECOMENDACIONES

- Continuar optimizando el uso del software EES para el modelamiento termodinámico, validando los resultados con datos experimentales o históricos de plantas similares para mejorar la precisión en el cálculo de áreas de transferencia, flujos másicos y caudales volumétricos.
- Se recomienda continuar utilizando Ansys para evaluar los factores de seguridad de los componentes, y realizar ajustes en el diseño si los factores de seguridad disminuyen significativamente por variaciones en las condiciones de operación o de producción. Considerar escenarios extremos para evaluar el comportamiento de los componentes más críticos.
- Se recomienda analizar el comportamiento del factor de seguridad (F.S.) y la deformación máxima de los componentes críticos del sistema, variando las propiedades mecánicas de los materiales. El objetivo es identificar materiales alternativos que cumplan con los requisitos de diseño y, al mismo tiempo, ofrezcan un ahorro económico en la construcción de la planta. Este análisis permitirá encontrar candidatos que mantengan la integridad estructural, optimizando los costos sin comprometer la seguridad ni la eficiencia del sistema.
- Se recomienda evaluar si el flujo de vahos a la salida del efecto III puede ser aprovechado en algún proceso dentro de la producción de harina de pescado. Actualmente, estos vahos son enviados a una torre de enfriamiento para luego ser tratados en la planta PAMA. Sin embargo, su reutilización en otros procesos productivos podría mejorar la eficiencia energética del sistema y reducir los costos operativos, optimizando el uso de recursos dentro de la planta.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

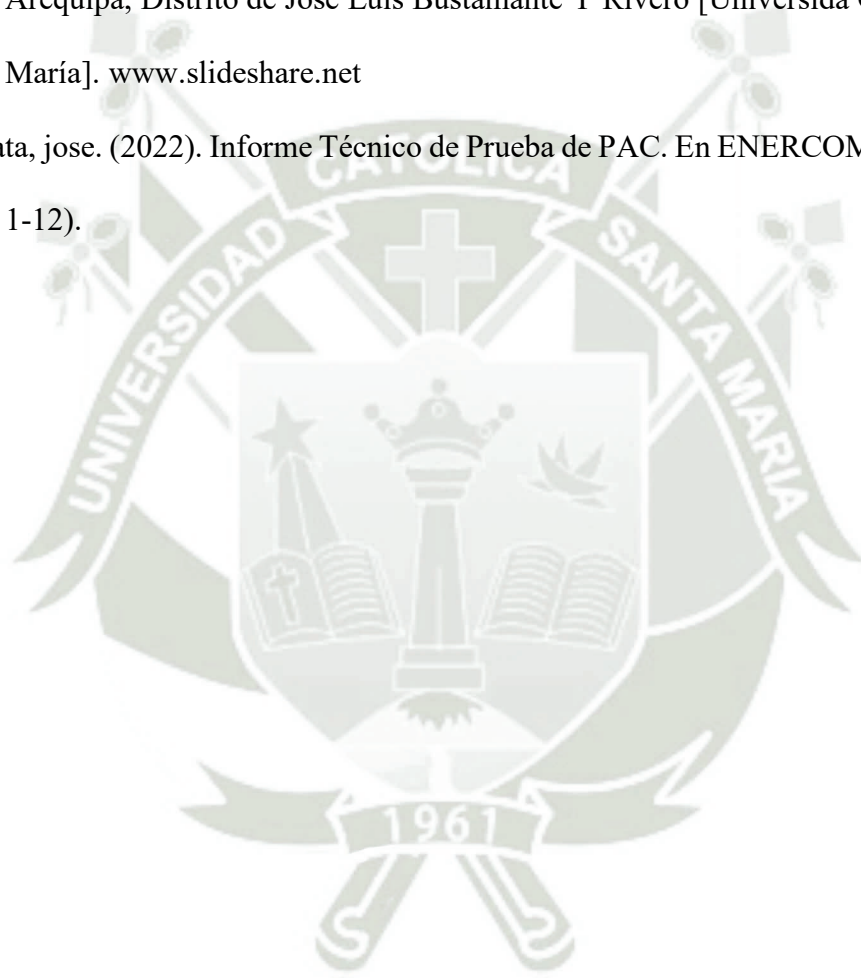
- ASME. (2007). Boiler & Pressure Vessel Code (The American Society of Mechanical Engineers, Ed.; 1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1, pp. 1-879).
- Atlas Steels. (2016). Stainless Steel Pipe, Fittings & Flanges. [www.atlassteels.com.au](http://www.atlassteels.com.au)
- Basantes, F., Montesdeoca, N., & Santos, M. (2014). Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Evaporador de Simple Efecto de Tubos Verticales Cortos. Escuela Superior Politécnica del litoral.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de Calor y Masa (McGraw-Hill Education, Ed.; 4ta ed.). McGraw-Hill.
- Colcha, A. (2022). Preservación del Recurso Anchoqueta con Adición de Aditivo Químico en las Bodegas de las Embarcaciones de la Empresa Tasa en la Temporada de Pesca 2021-II. Universidad Nacional de Piura.
- Colcha, K. (2017). Diseño de un Evaporador para la Concentración de Jugos de Frutas. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Domancic, P. (2022). Informe Técnico Validación Ampliación Pac 2 (ENERCOM, Ed.; pp. 1-16).
- Honores, O., & Casique, H. (2016). Evaluación Exergética y Termoeconómico de la Planta Evaporadora Agua de cola y Secadores Rotatubos de la Empresa Pesquera Tecnología de Alimentos S.A-Chimbote. Universidad Nacional del Santa.
- ICOITMA. (2007). Calculo y Diseño de Cambiadores de Calor Normas TEMA y Código ASME (pp. 1-324).
- Inoxpa. (2017, marzo 22). Especificaciones Bomba Helicoidal Kiber KSF. España. [www.inoxpa.com](http://www.inoxpa.com)
- Megyesy, E. (1989). Manual de Recipientes a Presión (Vol. 1). Limusa.

- Mesones, E. (2022). Gestión de Calidad en el Proceso de Elaboración de Harina de Pescado Anchoveta.
- MINEN. (2017). Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético Industria Pesquera (Ministerio de Energía y Minas, Ed.).
- Neira, R. (2015). Análisis de la Aplicación de Sistemas de Frio en la Captura y Transporte de Anchoveta y su Influencia en los Parámetros de Procesamiento de la Harina de Pescado. Universidad Nacional de San Agustín.
- Rodríguez, L., & García, R. (2016). Introducción al Análisis Estructural con Elementos Finitos Usando Ansys.
- Rodríguez, R. (2012). Mejorar la Eficiencia de un Evaporador Mediante el Uso de Enzimas en una Planta de Harina de Pescado. Universidad nacional de Trujillo.
- Sandoval, H. (2017). Modelamiento en Parámetros Distribuidos y Estimación de Parámetros Desconocidos por Optimización Dinámica de un Secador Rota-tubo de Harina de Pescado. Universidad de Piura.
- Serth, R. (2007). Process Heat Transfer Principles And Application (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Elsevier Science & Technology Books.
- Tarazona, E., & Portilla, J. (2016). Estudio Energético de Equipos Consumidores de Energía Térmica para la implementación Óptima de una Planta de Harina de Pescado en el Consorcio Pesquero el Ferrol SAC-Chimbote. Universidad Nacional del Santa.
- Villalba, E. (2019). Simulación de un Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor Usando Nanofluidos como Fluido Secundario. Universidad Católica de Santa María.
- Vite, E. (2015). Instalación de Planta Evaporadora de Agua de Cola (Agua Residual del Proceso de Harina de Pescado) En Montecristi – Colorado Vía a Barranco Prieto, para Reducir el Impacto Ambiental en las Aguas Residuales. Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

Vodopivec, A. (2011). Diseño Integral a Escala, de una Unidad Didáctica de Evaporación de Doble Efecto de Tubos Verticales Cortos, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

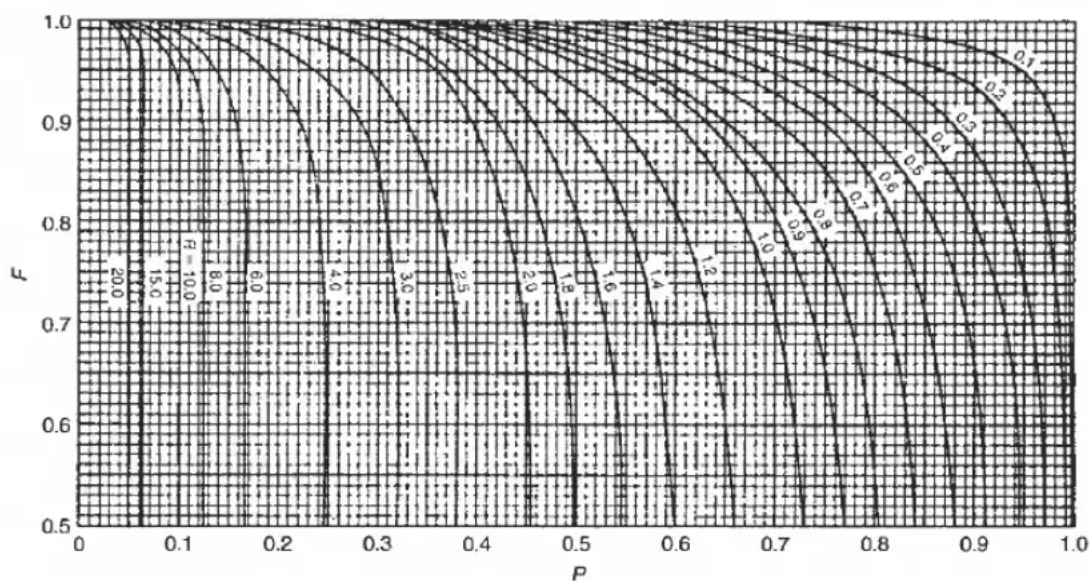
Yapo, R. (2023). Diseño de una Estación de Gas Natural Vehicular para la Ciudad de Arequipa, Distrito de José Luis Bustamante Y Rivero [Universidad Católica de Santa María]. [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Zapata, jose. (2022). Informe Técnico de Prueba de PAC. En ENERCOM (Ed.), 2022 (pp. 1-12).



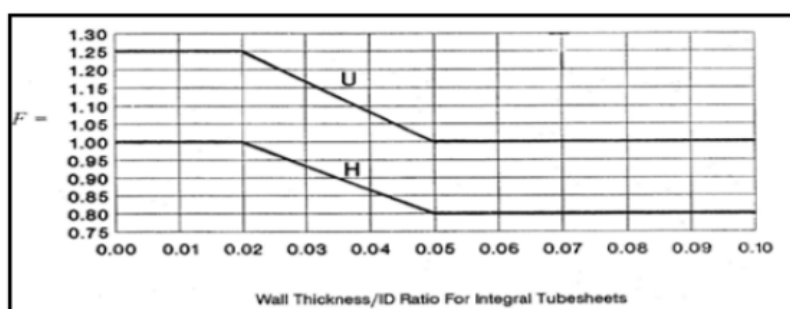
## ANEXOS

### Anexo 1: Factor de corrección de la temperatura media logarítmica






Nota: Recuperado de Robert W. Serth (2007)

### Anexo 2: Constante que depende del Tipo de Espejo



Nota: Recuperado de TEMA. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association

### Anexo 3: Eficiencia de la junta (E)

TIPOS NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E		
		Cuando la junta es:		
		a. Radiografiada total- mente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada
1	 <p>Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.</p>	1.00	0.85	0.70
2	 <p>Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar</p> <p>En juntas circunferenciales únicamente</p>	0.90	0.80	0.65
3	 <p>Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo</p>	—	—	0.60

Nota: Recuperado de Código ASME et al. (2008)

**Anexo 4:** Dimensiones nominales de plancha AISI 304

SISTEMA MÉTRICO (mm)	TOLERANCIA ESPESOR +/- en mm	ACABADO SUPERFICIAL	PESO ESTIMADO kg/pl	SISTEMA INGLÉS Espesor Equiv (pulg)
3.0 x 1220 x 2440	0.25	1	70.70	1/8"
3.0 x 1524 x 3048	0.33	1	110.51	1/8"
4.5 x 1220 x 2440	0.47 - 0.25	1	106.05	3/16"
4.5 x 1524 x 3048	0.51 - 0.25	1	165.76	3/16"
6.0 x 1220 x 2440	0.51 - 0.25	1	141.40	1/4"
6.0 x 1524 x 3048	0.51 - 0.25	1	221.02	1/4"
9.0 x 1524 x 3048	0.75 - 0.25	1	331.52	3/8"

Nota: Recuperado de Norma ASTM A480 sección III

**Anexo 5:** Propiedades mecánicas y dimensiones de pernos de anclaje

TABLA A				TABLA B NUMERO DE PERNOS DE ANCLAJE		
Tamaño del perno	Área en la raíz del perno, pulg <sup>2</sup>	Dimensión, pulg		Diámetro del círculo base de pernos, pulg	Mínimo	Máximo
		l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>			
1/2	0.126	7/8	5/8	24 a 36	4	4
5/8	0.202	1	3/4	42 a 54	8	8
3/4	0.302	1-1/8	13/16	60 a 78	12	12
7/8	0.419	1-1/4	15/16	84 a 102	12	16
1	0.551	1-3/8	1-1/16	108 a 126	16	20
1 1/8	0.693	1-1/2	1-1/8	132 a 144	20	24
1 1/4	0.890	1-3/4	1-1/4			
1 3/8	1.054	1-7/8	1-3/8			
1 1/2	1.294	2	1-1/2			
1 5/8	1.515	2-1/8	1-5/8			
1 3/4	1.744	2-1/4	1-3/4			
1 7/8	2.049	2-3/8	1-7/8			
2	2.300	2-1/2	2			
2 1/4	3.020	2-3/4	2-1/4			
2 1/2	3.715	3-1/16	2-3/8			
2 3/4	4.618	3-3/8	2-5/8			
3	5.621	3-5/8	2-7/8			

TABLA C ESFUERZOS MAXIMOS PERMITIDOS PARA PERNOS USADOS COMO ANCLAS		
Número de especificación	Diámetro, pulg	Máx. Esf. permitido, lb/pulg <sup>2</sup>
SA 325	Todos los diámetros	15,000
SA 193 B 7	2 1/2 y menores	18,000
SA 193 B 16	2 1/2 y menores	18,000
SA 193 B 7	Más de 2 1/2 hasta 4 incl.	16,000
SA 193 B 16	Más de 2 1/2 hasta 4 incl.	15,700

Nota: Recuperado de Megyesy et al. (1989)

**Anexo 6:** Datos técnicos de pernos ASTM A193 grado B7

Diámetro Nominal (pulgadas)	Paso (hilos/pulgada)	Área Útil (in <sup>2</sup> )	Área Útil (mm <sup>2</sup> )	Diámetro Recomendado del Agujero (pulgadas)	Diámetro Recomendado del Agujero (mm)
1"	8	0.606	391	1 1/16	26.99
1 1/8"	7	0.763	492	1 3/16	30.16
1 1/4"	7	0.969	625	1 5/16	33.34
1 3/8"	6	1.155	745	1 7/16	36.51
1 1/2"	6	1.405	906	1 9/16	39.69
1 3/4"	5	2.074	1338	1 13/16	46.04
2"	4 1/2	2.741	1768	2 1/16	52.39

Nota: Recuperado de Norma ASTM A193

Anexo 7: Parámetros para determinación de espesor de anillo base

TABLA D Valores de las constantes en función de K					TABLA F Momento flexionante por unidad de longitud de la sección de una placa perpendicular a los ejes X y Y, respectivamente. Use el valor mayor, $M_x$ o $M_y$ .		
k	$C_c$	$C_t$	j	z	$l_1/b$	$M_x$	$M_y$
0.00	0.000	3.142	0.750	0.500			
.05	0.600	3.008	.760	.490	0.333	0.0078 $f_c b^2$	- 0.428 $f_c l_1^2$
.10	0.852	2.887	.766	.480	0.500	0.0293 $f_c b^2$	- 0.319 $f_c l_1^2$
.15	1.049	2.772	.771	.469	0.667	0.0558 $f_c b^2$	- 0.227 $f_c l_1^2$
.20	1.218	2.661	.776	.459	1.000	0.0972 $f_c b^2$	- 0.119 $f_c l_1^2$
.25	1.370	2.551	.779	.448	1.500	0.123 $f_c b^2$	- 0.124 $f_c b^2$
.30	1.510	2.442	.781	.438	2.000	0.131 $f_c b^2$	- 0.125 $f_c b^2$
.35	1.640	2.333	.783	.427	3.000	0.133 $f_c b^2$	- 0.125 $f_c b^2$
.40	1.765	2.224	.784	.416	$\infty$	0.133 $f_c b^2$	- 0.125 $f_c b^2$
.45	1.884	2.113	.785	.404			
.50	2.000	2.000	.785	.393			
.55	2.113	1.884	.785	.381			
.60	2.224	1.765	.784	.369			
.65	2.333	1.640	.783	.357			
.70	2.442	1.510	.781	.344			
.75	2.551	1.370	.779	.331			
.80	2.661	1.218	.776	.316			
.85	2.772	1.049	.771	.302			
.90	2.887	0.852	.766	.286			
.95	3.008	0.600	.760	.270			
1.00	3.142	0.000	.750	.250			

TABLA E Propiedades de cuatro mezclas de concreto				
Resist. máx. a los 28 días, lb/pulg <sup>2</sup>	2000	2500	3000	3750
Resist. permitida a compr., $f_c$ , lb/pulg <sup>2</sup>	800	1000	1200	1500
Carga de apoyo segura, $f_b$ , lb/pulg <sup>2</sup>	500	625	750	938
Factor n	15	12	10	8

Nota: Recuperado de Megyesy (1989)

Anexo 8: Diseño de silletas de pernos de anclaje para torres altas

DIMENSIONES (pulgadas)							
Diám. del perno de anclaje	A	B	C	D	E	F	G
1	1 3/4	3	2 1/2	1/2	3/4	1 1/4	1 1/2
1 1/8	1 7/8	3	2 1/2	1/2	3/4	1 3/8	1 5/8
1 1/4	2	3	2 1/2	1/2	1	1 1/2	1 3/4
1 3/8	2 1/8	4	3	5/8	1	1 5/8	1 7/8
1 1/2	2 1/4	4	3	5/8	1 1/4	1 3/4	2
1 5/8	2 3/8	4	3	5/8	1 1/4	1 7/8	2 1/8
1 3/4	2 1/2	5	3 1/2	3/4	1 1/2	2	2 1/4
1 7/8	2 5/8	5	3 1/2	3/4	1 1/2	2 1/8	2 3/8
2	2 3/4	5	3 1/2	3/4	1 3/4	2 1/4	2 1/2
2 1/4	3	6	4	1	1 3/4	2 1/2	2 3/4
2 1/2	3 1/4	6	4	1	2	2 3/4	3
2 3/4	3 1/2	7	5	1 1/4	2 1/2	3	3 1/4
3	3 3/4	7	5	1 1/4	2 1/2	3 1/4	3 1/2

Nota: Recuperado de Megyesy et al. (1989)

**Anexo 9:** Densidades respecto a grados Brix o de concentración

Grados Brix (°Bx)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
0	1.0000
5	1.0200
10	1.0400
15	1.0610
20	1.0830
25	1.1058
30	1.1296
35	1.1543
40	1.1799
45	1.2065
50	1.2341
55	1.2626
60	1.2922
65	1.3228
70	1.3544

Nota: Recuperado de Honores & Casique et al. (2016)

**Anexo 10:** Dimensiones de tuberías AISI 304

Nominal Pipe Size		Outside Diameter (mm)	Wall Thickness (mm)							
DN	NPS		Sch 5S		Sch 10S		Sch 40S		Sch 80S	
			WT (mm)	Weight (kg/m)	WT (mm)	Weight (kg/m)	WT (mm)	Weight (kg/m)	WT (mm)	Weight (kg/m)
6	¼	10.3			1.24	0.28	1.73	0.37	2.41	0.47
8	¼	13.7			1.65	0.49	2.24	0.63	3.02	0.80
10	¾	17.1			1.65	0.63	2.31	0.84	3.20	1.10
15	½	21.3	1.65	0.80	2.11	1.00	2.77	1.27	3.73	1.62
20	¾	26.7	1.65	1.02	2.11	1.28	2.87	1.69	3.91	2.20
25	1	33.4	1.65	1.29	2.77	2.09	3.38	2.50	4.55	3.24
32	1½	42.2	1.65	1.65	2.77	2.69	3.56	3.39	4.85	4.47
40	1½	48.3	1.65	1.90	2.77	3.11	3.68	4.05	5.08	5.41
50	2	60.3	1.65	2.39	2.77	3.93	3.91	5.44	5.54	7.48
65	2½	73.0	2.11	3.69	3.05	5.26	5.16	8.63	7.01	11.41
80	3	88.9	2.11	4.52	3.05	6.46	5.49	11.29	7.62	15.27
90	3½	101.6	2.11	5.18	3.05	7.41	5.74	13.57	8.08	18.64
100	4	114.3	2.11	5.84	3.05	8.37	6.02	16.08	8.56	22.32
125	5	141.3	2.77	9.46	3.40	11.56	6.55	21.77	9.53	30.97
150	6	168.3	2.77	11.31	3.40	13.83	7.11	28.26	10.97	42.56
200	8	219.1	2.77	14.78	3.76	19.97	8.18	42.55	12.70	64.64
250	10	273.1	3.40	22.61	4.19	27.79	9.27	60.31	12.70	81.56
300	12	323.9	3.96	31.25	4.57	35.99	9.53	73.88	12.70	97.47
350	14	355.6	3.96	34.34	4.78	41.36	9.53	81.33	12.70	107.40
400	16	406.4	4.19	41.56	4.78	47.34	9.53	93.27	12.70	123.31
450	18	457	4.19	46.79	4.78	53.31	9.53	105.17	12.70	139.16
500	20	508	4.78	59.32	5.54	68.65	9.53	117.15	12.70	155.13
550	22	559	4.78	65.33	5.54	75.62				
600	24	610	5.54	82.58	6.35	94.53	9.53	141.12	12.70	187.07
650	26	660								
700	28	711								
750	30	762	6.35	118.34	7.92	147.29				

Nota: Recuperado de Atlas Steels (2016)

Anexo 11: Especificaciones técnicas de plancha AISI 304

## PLANCHAS DE ACERO INOXIDABLE ASTM A240, ASTM A480 CALIDAD 304 ACABADO N1



\* Imagen referencial

Material: ASTM A240 304.  
Tolerancias: ASTM A480.

Anchos de 4' (1200 mm) y 5' (1500 mm).  
Largos de 8' (2400 mm) y 10' (3000 mm).

Se mide en espesor x ancho x largo.

Nº1 Laminado en caliente, recogido y decapado. Conocido como acabado INDUSTRIAL.

### TOLERANCIAS EN ESPESOR ASTM A480

Espesor específico	Variaciones permitidas por encima y por debajo		
	in. (mm)	inch	mm
Hasta 0.005 [0.13]		0.001	0.03
Sobre 0.005 [0.13] hasta 0.007 [0.18], incl		0.0015	0.04
Sobre 0.007 [0.18] hasta 0.016 [0.41], incl		0.002	0.05
Sobre 0.016 [0.41] hasta 0.026 [0.66], incl		0.003	0.08
Sobre 0.026 [0.66] hasta 0.040 [1.02], incl		0.004	0.10
Sobre 0.040 [1.02] hasta 0.058 [1.47], incl		0.005	0.13
Sobre 0.058 [1.47] hasta 0.072 [1.83], incl		0.006	0.15
Sobre 0.072 [1.83] hasta 0.083 [2.11], incl		0.007	0.18
Sobre 0.083 [2.11] hasta 0.098 [2.49], incl		0.008	0.20
Sobre 0.098 [2.49] hasta 0.114 [2.90], incl		0.009	0.23
Sobre 0.114 [2.90] hasta 0.130 [3.30], incl		0.010	0.25
Sobre 0.130 [3.30] hasta 0.145 [3.68], incl		0.012	0.30
Sobre 0.145 [3.68] hasta < 0.1875 [4.76]		0.014	0.36

Espesores de hasta 10 pulgadas [254,0 mm], excluidas, la tolerancia bajo el espesor especificado es de 0,010 pulgadas [0,25 mm].

Espesor		Peso Teórico (Kg)	
pulg	mm	4' x 8'	5' x 10'
	0.3	7.14	11.15
1/64	0.4	9.53	14.86
1/54	0.45	10.72	16.72
1/46	0.50	11.91	18.58
	0.55	13.09	20.44
1/40	0.6	14.29	22.30
	0.7	16.67	26.01
1/32	0.8	19.05	29.73
1/27	0.9	21.43	33.45
1/20	1.2	28.58	44.59
1/16	1.5	35.72	55.74
5/64	2.0	47.57	74.32
3/32	2.5	59.45	92.90
1/8	3.0	71.35	111.48
	3.5	83.24	130.26
5/32	4.0	95.13	148.64
3/16	4.76	113.21	176.89
1/4	6.35	151.02	235.97
3/8	9.53	226.65	354.15
1/2	12.70	302.05	471.95
5/8	15.00	356.75	557.42
	18.00	428.10	668.90
3/4	19.05	453.07	707.92
1	25.40	604.09	943.89
1 1/4	31.75	755.12	1179.87
1 1/2	38.10	906.14	1415.84
2	50.80	1208.19	1887.79

Bomba Helicoidal

Kiber KSF



**I Aplicación**

Las bombas KSF son adecuadas tanto para productos de baja como de alta viscosidad, y también para productos que contengan partículas blandas. El bombeo de aceite, vino, concentrados y bebidas en general son unas de las aplicaciones principales. También se pueden utilizar para productos alimentarios viscosos.

**I Diseño y características**

La KSF es una bomba de tornillo helicoidal sanitaria. Ejecución monobloc con acoplamiento directamente al accionamiento. Debido a su diseño tiene la capacidad de ser reversible y autoaspirante. Transmisión abierta (diseño sanitario). Boca de impulsión excéntrica.

**I Especificaciones técnicas**

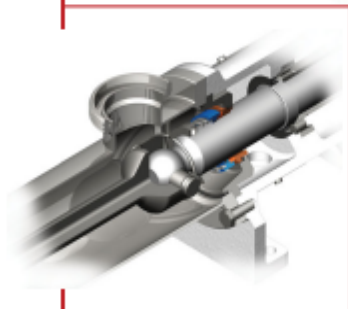
<b>Materiales:</b>	
Piezas en contacto con el producto	Acero inoxidable AISI 316L (1.4404)
Otras piezas de acero	Acero inoxidable AISI 304 (1.4301)
Soporte brida	GG-22
Estator	NBR negro (según FDA y CE 1935/2004)
Juntas en contacto con el producto	FPM (según FDA y CE 1935/2004)

<b>Cierre mecánico simple interior EN 12756 11k (según FDA y CE 1935/2004):</b>	
Parte giratoria	Carburo de Silicio (SiC)
Parte estacionaria	Grafito (C)
Juntas	FPM

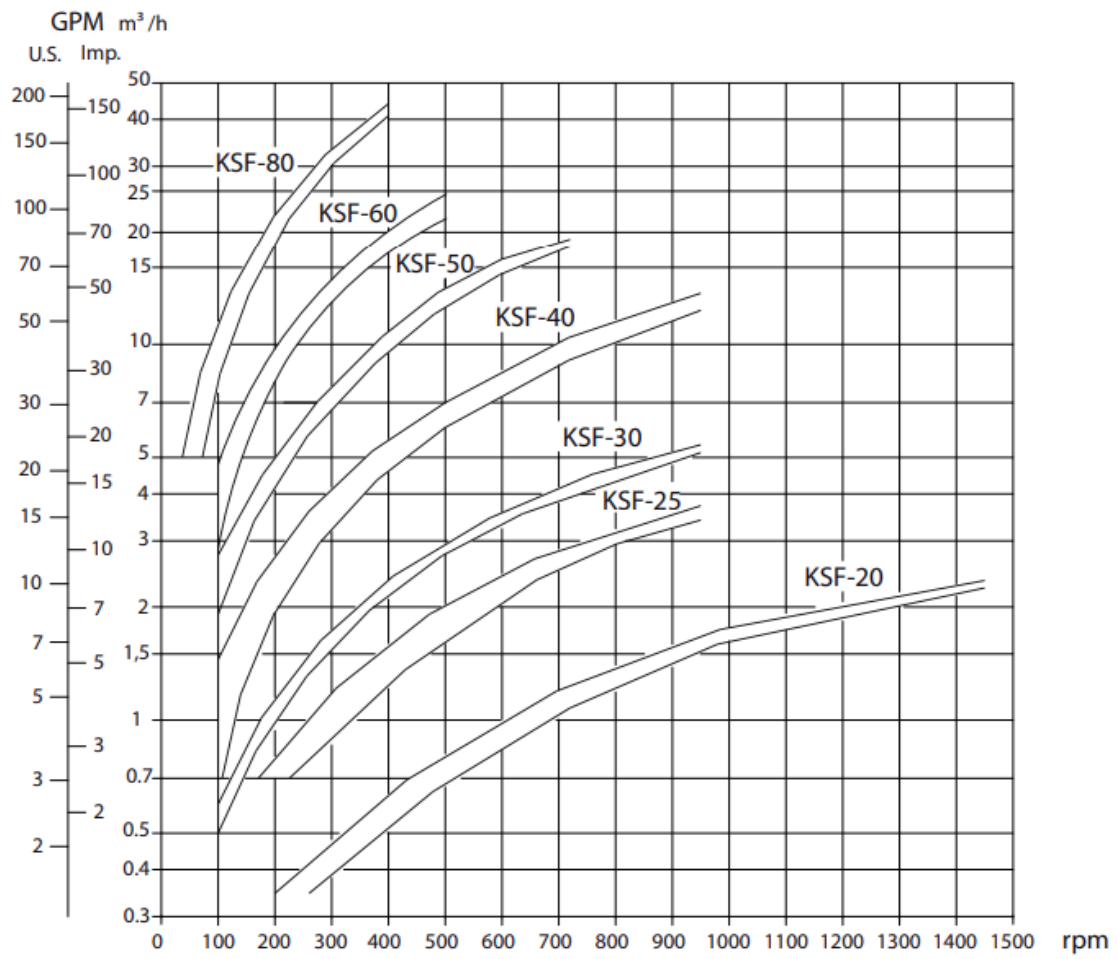
<b>Acabado superficial:</b>	
Interno	Pulido brillante, Ra ≤ 0,8 µm
Externo	Mate

<b>Conexiones:</b>	DIN 11851
	CLAMP
	SMS

<b>Límites de operación (según modelo):</b>		
Caudal máximo	45 m <sup>3</sup> /h	198 US GPM
Presión máxima de trabajo		
- simple etapa	6 bar	87 PSI
- doble etapa	12 bar	174 PSI
Temperatura máxima de trabajo	85 °C (según materiales)	185 °F
Velocidad máxima	1450 rpm	



**Anexo 13:** *Curva de bomba tipo tornillo*



## APENDICES

File:D:\Tesis\Tesis\TESIS 2.EES 23/10/2024 05:54:29 a.m. Page 2  
 14: #4402: EASY ENGINEERING, [https://www.youtube.com/channel/UCjC8ulmve2QNRJXhDpk-L2A+CNlxJID\\_JLNlyNINGGBDEICJH](https://www.youtube.com/channel/UCjC8ulmve2QNRJXhDpk-L2A+CNlxJID_JLNlyNINGGBDEICJH)

- 1: "CÁLCULO TERMODINÁMICO"
- 2: "DATOS DE ENTRADA"
- 3:
- 4: "Flujos masicos"
- 5: //m\_dot\_va=33370 [kg/hr] "Flujo masico de vahos al ingreso del efecto I"
- 6: //m\_dot\_ag=115220 [kg/hr] "Flujo masico del agua de cola al ingreso del efecto III"
- 7: //m\_dot\_c1=27000 [kg/hr] "Flujo masico de concentrado a la salida del efecto I"
- 8:
- 9: "Temperaturas de efectos y alimentación de vahos"
- 10: //T\_va= 96 [°C] "Temperatura de ingreso de vahos primarios al efecto I"
- 11: //T\_1= 85 [°C] "Temperatura de efecto I"
- 12: //T\_2= 60 [°C] "Temperatura de efecto II"
- 13: //T\_3= 40 [°C] "Temperatura de efecto III"
- 14: //T\_ref= 0 [°C] "Temperatura de referencia"
- 15:
- 16: "Capacidades caloríficas y porcentaje de concentrados"
- 17: //Cp\_ag= 3,891 [kJ/(kg °C)] "Capacidad calorífica del agua de cola al ingreso del efecto III"
- 18: //Cp\_c1=2,887 [kJ/(kg °C)] "Capacidad calorífica del concentrado a la salida del efecto I"
- 19: //Cp\_c2=3,753 [kJ/(kg °C)] "Capacidad calorífica del concentrado a la salida del efecto II"
- 20: //Cp\_c3=3,800 [kJ/(kg °C)] "Capacidad calorífica del concentrado a la salida del efecto III"
- 21: //x\_c1=35 [%] "Porcentaje de concentrado a la salida del efecto I"
- 22:
- 23: "Hallamos los calores latentes del vapor de agua"
- 24: DELTAh\_vahos=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T\_va) "Calor latente transferido al efecto I"
- 25: DELTAh\_v1=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T\_1) "Calor latente transferido al efecto II"
- 26: DELTAh\_v2=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T\_2) "Calor latente transferido al efecto II"
- 27: DELTAh\_v3=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T\_3) "Calor latente transferido al condensador barometrico"
- 28: h\_1=Enthalpy(Water;T=T\_1;x=1)
- 29: h\_2=Enthalpy(Water;T=T\_2;x=1)
- 30: h\_3=Enthalpy(Water;T=T\_3;x=1)
- 31:
- 32:
- 33: "Resolviendo la ecuaciones de balance de energia"
- 34:
- 35: "Efecto I"
- 36: (m\_dot\_va\*DELTAh\_vahos)+(m\_dot\_c2\*Cp\_c2\*(T\_2-T\_ref))=(m\_dot\_v1\*h\_1)+(m\_dot\_c1\*Cp\_c1\*(T\_1-T\_ref)) "Ecuación 4.9"
- 37: m\_dot\_c1=m\_dot\_c2-m\_dot\_v1 "Ecuación 4.5"
- 38:
- 39: "Efecto II"
- 40: (m\_dot\_v1\*DELTAh\_v1)+(m\_dot\_c3\*Cp\_c3\*(T\_3-T\_ref))=(m\_dot\_v2\*h\_2)+(m\_dot\_c2\*Cp\_c2\*(T\_2-T\_ref)) "Ecuación 4.11"
- 41: m\_dot\_c2=m\_dot\_c3-m\_dot\_v2 "Ecuación 4.6"
- 42:
- 43: "Efecto III"
- 44: (m\_dot\_v2\*DELTAh\_v2)+(m\_dot\_ag\*Cp\_ag\*(T\_ag-T\_ref))=(m\_dot\_v3\*h\_3)+(m\_dot\_c3\*Cp\_c3\*(T\_3-T\_ref)) "Ecuación 4.13"
- 45: m\_dot\_c3=m\_dot\_ag-m\_dot\_v3 "Ecuación 4.7"
- 46:
- 47: "Porcentajes de concentrado en cada efecto"
- 48:
- 49: "Efecto I"
- 50: m\_dot\_c2\*(x\_c2)=m\_dot\_c1\*(x\_c1) "Ecuación 4.1"
- 51:

52:	<i>"Efecto III"</i>	
53:	$m_{\dot{c}3}(x_{c3})=m_{\dot{c}1}(x_{c1})$ <i>4.1"</i>	<i>"Ecuación"</i>
54:		
55:	<i>"Cantidad de agua Evaporada"</i>	
56:	$m_{\dot{a}g_{\text{agua\_evap}}}=m_{\dot{a}g}-m_{\dot{c}1}$ <i>4.3"</i>	<i>"Ecuación"</i>
57:		
58:	<i>"Volumen especificos"</i>	
59:	$v_1=Volume(Water;T=T_1;x=1)$	
60:	$v_2=Volume(Water;T=T_2;x=1)$	
61:	$v_3=Volume(Water;T=T_3;x=1)$	
62:		
63:	<i>"Área de transferencia de calor en cada efecto"</i>	
64:		
65:	$U_{\text{Efecto I}} = 2100 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto I"</i>	<i>"Coeficiente"</i>
66:	$U_{\text{Efecto II}} = 1800 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto II"</i>	<i>"Coeficiente"</i>
67:	$U_{\text{Efecto III}} = 1800 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto III"</i>	<i>"Coeficiente"</i>
68:	$Pot = 1000 \text{ [W/kW]}$ <i>conversiónI"</i>	<i>"Factor de"</i>
69:	$Tie = 3600 \text{ [Hr/s]}$ <i>global Efecto III"</i>	<i>"Coeficiente"</i>
70:		
71:	$T_{\text{va 2}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto I"</i>	<i>"Temperatur"</i>
72:	$T_{\text{v2 2}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto II"</i>	<i>"Temperatur"</i>
73:	$T_{\text{v2 3}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto III"</i>	<i>"Temperatur"</i>
74:	$F_{\text{LMTD I}} = 0,850$ <i>corrección Efecto I"</i>	<i>"Factor de"</i>
75:		
76:	$LMTD_{\text{Efecto I}} = ((T_{\text{va 1}} - T_{\text{va 2}}) - (T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v2 3}})) / \ln((T_{\text{va 1}} - T_{\text{v2 2}}) / (T_{\text{va 2}} - T_{\text{v2 3}})) * F_{\text{LMTD I}}$ <i>a media logarítmica Efecto I"</i>	<i>"Temperatur"</i>
77:	$LMTD_{\text{Efecto II}} = ((T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v2 3}}) - (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{Amb}})) / \ln((T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v3 2}}) / (T_{\text{v2 3}} - T_{\text{Amb}})) * F_{\text{LMTD II}}$ <i>a media logarítmica Efecto II"</i>	<i>"Temperatur"</i>
78:	$LMTD_{\text{Efecto III}} = ((T_{\text{v2 3}} - T_{\text{v3 2}}) - (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{Amb}})) / \ln((T_{\text{v2 3}} - T_{\text{v3 2}}) / (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{Amb}})) * F_{\text{LMTD III}}$	
79:		
80:	$A_{\text{Efecto I}} = 1,15 * (m_{\dot{v}a} * \Delta T_{\text{Ah vahos}} * Pot) / (U_{\text{Efecto I}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto I}}))$ <i>transferencia Efecto I"</i>	<i>"Área de"</i>
81:	$A_{\text{Efecto II}} = 1,15 * (m_{\dot{v}1} * \Delta T_{\text{Ah v1}} * Pot) / (U_{\text{Efecto II}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto II}}))$ <i>transferencia Efecto II"</i>	<i>"Área de"</i>
82:	$A_{\text{Efecto III}} = 1,15 * (m_{\dot{v}2} * \Delta T_{\text{Ah v2}} * Pot) / (U_{\text{Efecto III}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto III}}))$ <i>transferencia Efecto III"</i>	<i>"Área de"</i>
83:		
84:		
85:		
86:		

52:	<i>"Efecto III"</i>	
53:	$m_{\dot{c}3}(x_{c3})=m_{\dot{c}1}(x_{c1})$ 4.1"	"Ecuación
54:		
55:	<i>"Cantidad de agua Evaporada"</i>	
56:	$m_{\dot{a}g_{\text{agua\_evap}}}=m_{\dot{a}g}-m_{\dot{c}1}$ 4.3"	"Ecuación
57:		
58:	<i>"Volumen especificos"</i>	
59:	$v_1=Volume(Water;T=T_1;x=1)$	
60:	$v_2=Volume(Water;T=T_2;x=1)$	
61:	$v_3=Volume(Water;T=T_3;x=1)$	
62:		
63:	<i>"Área de transferencia de calor en cada efecto"</i>	
64:		
65:	$U_{\text{Efecto I}} = 2100 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto I"</i>	"Coeficiente
66:	$U_{\text{Efecto II}} = 1800 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto II"</i>	"Coeficiente
67:	$U_{\text{Efecto III}} = 1800 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ <i>global Efecto III"</i>	"Coeficiente
68:	$Pot = 1000 \text{ [W/kW]}$ <i>conversiónI"</i>	"Factor de
69:	$Tie = 3600 \text{ [Hr/s]}$ <i>global Efecto III"</i>	"Coeficiente
70:		
71:	$T_{\text{va 2}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto I"</i>	"Temperatur
72:	$T_{\text{v2 2}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto II"</i>	"Temperatur
73:	$T_{\text{v2 3}} = 64 \text{ [°C]}$ <i>a de salida de vahos del efecto III"</i>	"Temperatur
74:	$F_{\text{LMTD I}} = 0,850$ <i>corrección Efecto I"</i>	"Factor de
75:		
76:	$LMTD_{\text{Efecto I}} = ((T_{\text{va 1}} - T_{\text{va 2}}) - (T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v2 3}})) / \ln((T_{\text{va 1}} - T_{\text{v2 2}}) / (T_{\text{va 2}} - T_{\text{v2 3}})) * F_{\text{LMTD I}}$ <i>a media logarítmica Efecto I"</i>	"Temperatur
77:	$LMTD_{\text{Efecto II}} = ((T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v2 3}}) - (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{v3 3}})) / \ln((T_{\text{v2 2}} - T_{\text{v3 2}}) / (T_{\text{v2 3}} - T_{\text{v3 3}})) * F_{\text{LMTD II}}$ <i>a media logarítmica Efecto II"</i>	"Temperatur
78:	$LMTD_{\text{Efecto III}} = ((T_{\text{v2 3}} - T_{\text{v3 2}}) - (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{v3 3}})) / \ln((T_{\text{v2 3}} - T_{\text{v3 2}}) / (T_{\text{v3 2}} - T_{\text{v3 3}})) * F_{\text{LMTD III}}$	
79:		
80:	$A_{\text{Efecto I}} = 1,15 * (m_{\dot{v}a} * \Delta T_{\text{Ah vahos}} * Pot) / (U_{\text{Efecto I}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto I}}))$ <i>transferencia Efecto I"</i>	"Área de
81:	$A_{\text{Efecto II}} = 1,15 * (m_{\dot{v}1} * \Delta T_{\text{Ah v1}} * Pot) / (U_{\text{Efecto II}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto II}}))$ <i>transferencia Efecto II"</i>	"Área de
82:	$A_{\text{Efecto III}} = 1,15 * (m_{\dot{v}2} * \Delta T_{\text{Ah v2}} * Pot) / (U_{\text{Efecto III}} * Tie * (LMTD_{\text{Efecto III}}))$ <i>transferencia Efecto III"</i>	"Área de
83:		
84:		
85:		
86:		

## CÁLCULO TERMODINÁMICO

### DATOS DE ENTRADA

Flujos masicos

Temperaturas de efectos y alimentación de vahos

Capacidades caloríficas y porcentaje de concentrados

Hallamos los calores latentes del vapor de agua

$$\Delta h_{\text{vahos}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [\text{water}; T = T_{\text{va}}] \quad \text{Calor latente transferido al efecto I}$$

$$\Delta h_{\text{v1}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [\text{water}; T = T_1] \quad \text{Calor latente transferido al efecto II}$$

$$\Delta h_{\text{v2}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [\text{water}; T = T_2] \quad \text{Calor latente transferido al efecto II}$$

$$\Delta h_{\text{v3}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [\text{water}; T = T_3] \quad \text{Calor latente transferido al condensador barometrico}$$

$$h_1 = h [\text{water}; T = T_1; x = 1]$$

$$h_2 = h [\text{water}; T = T_2; x = 1]$$

$$h_3 = h [\text{water}; T = T_3; x = 1]$$

Resolviendo la ecuaciones de balance de energia

Efecto I

$$\dot{m}_{\text{va}} \cdot \Delta h_{\text{vahos}} + \dot{m}_{\text{c2}} \cdot C_{p_{\text{c2}}} \cdot [T_2 - T_{\text{ref}}] = \dot{m}_{\text{v1}} \cdot h_1 + \dot{m}_{\text{c1}} \cdot C_{p_{\text{c1}}} \cdot [T_1 - T_{\text{ref}}] \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$\dot{m}_{\text{c1}} = \dot{m}_{\text{c2}} - \dot{m}_{\text{v1}} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Efecto II

$$\dot{m}_{\text{v1}} \cdot \Delta h_{\text{v1}} + \dot{m}_{\text{c3}} \cdot C_{p_{\text{c3}}} \cdot [T_3 - T_{\text{ref}}] = \dot{m}_{\text{v2}} \cdot h_2 + \dot{m}_{\text{c2}} \cdot C_{p_{\text{c2}}} \cdot [T_2 - T_{\text{ref}}] \quad \text{Ecuación 4.11}$$

$$\dot{m}_{\text{c2}} = \dot{m}_{\text{c3}} - \dot{m}_{\text{v2}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Efecto III

$$\dot{m}_{\text{v2}} \cdot \Delta h_{\text{v2}} + \dot{m}_{\text{ag}} \cdot C_{p_{\text{ag}}} \cdot [T_{\text{ag}} - T_{\text{ref}}] = \dot{m}_{\text{v3}} \cdot h_3 + \dot{m}_{\text{c3}} \cdot C_{p_{\text{c3}}} \cdot [T_3 - T_{\text{ref}}] \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$\dot{m}_{\text{c3}} = \dot{m}_{\text{ag}} - \dot{m}_{\text{v3}} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Porcentajes de concentrado en cada efecto

Efecto I

$$\dot{m}_{\text{c2}} \cdot x_{\text{c2}} = \dot{m}_{\text{c1}} \cdot x_{\text{c1}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Efecto III

$$\dot{m}_{\text{c3}} \cdot x_{\text{c3}} = \dot{m}_{\text{c1}} \cdot x_{\text{c1}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Cantidad de agua Evaporada

$$\dot{m}_{\text{agua, evap}} = \dot{m}_{\text{ag}} - \dot{m}_{\text{c1}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Volumen especificos

$$v_1 = \mathbf{v} [\text{water}; T = T_1; x = 1]$$

$$v_2 = \mathbf{v} [\text{water}; T = T_2; x = 1]$$

$$v_3 = \mathbf{v} [\text{water}; T = T_3; x = 1]$$

*Área de transferencia de calor en cada efecto*

$$LMTD_{\text{Efecto,I}} = \left[ \frac{T_{va} - T_1 - (T_{va,2} - T_2)}{\ln \left( \frac{T_{va} - T_1}{T_{va,2} - T_2} \right)} \right] \cdot F_{LMTD,I} \quad \text{Temperatura media logarítmica Efecto I}$$

$$LMTD_{\text{Efecto,II}} = \left[ \frac{T_1 - T_2 - (T_{v2,2} - T_3)}{\ln \left( \frac{T_1 - T_2}{T_{v2,2} - T_3} \right)} \right] \cdot F_{LMTD,II} \quad \text{Temperatura media logarítmica Efecto II}$$

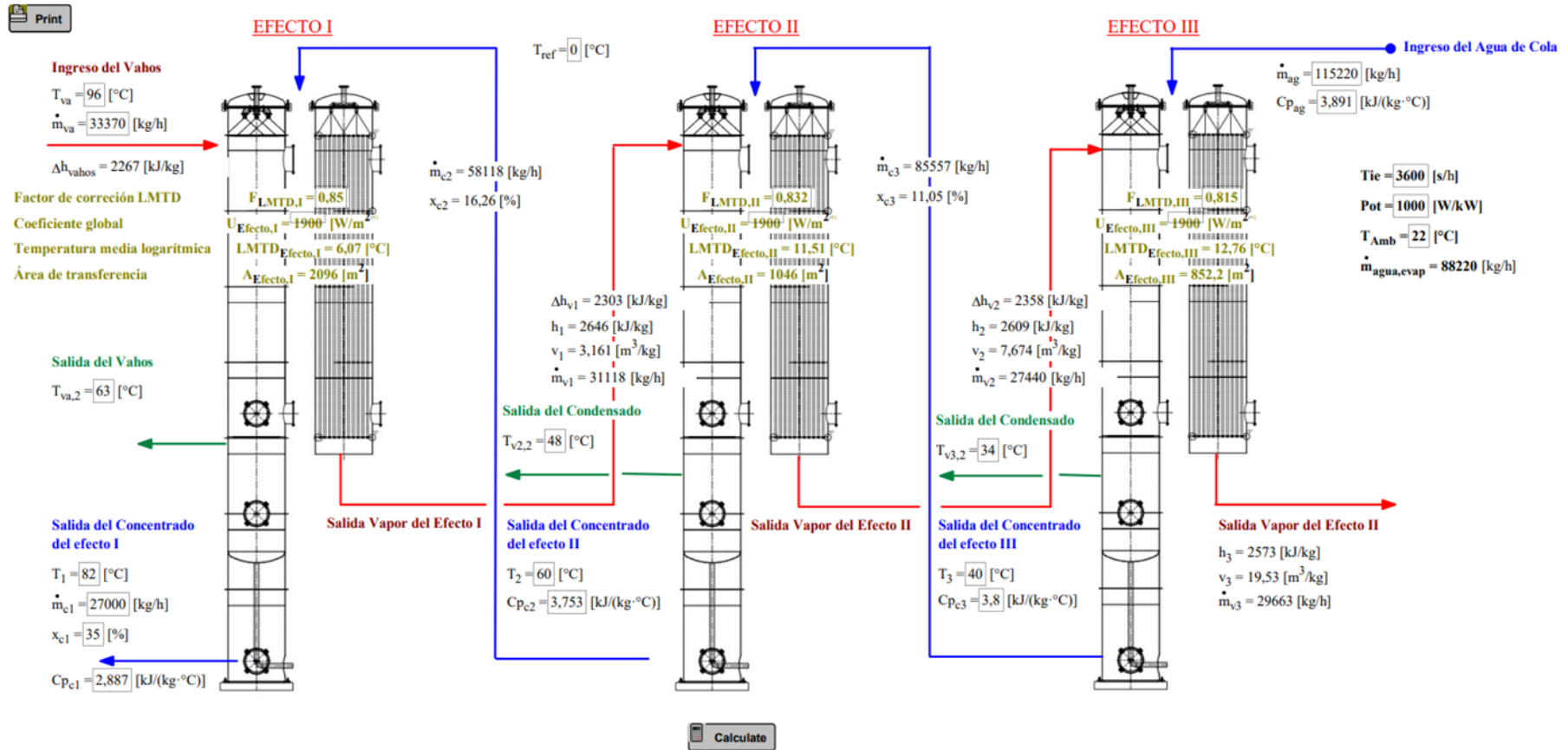
$$LMTD_{\text{Efecto,III}} = \left[ \frac{T_2 - T_3 - (T_{v3,2} - T_{Amb})}{\ln \left( \frac{T_2 - T_3}{T_{v3,2} - T_{Amb}} \right)} \right] \cdot F_{LMTD,III}$$

$$A_{\text{Efecto,I}} = 1,15 \cdot \frac{\dot{m}_{va} \cdot \Delta h_{vahas} \cdot Pot}{U_{\text{Efecto,I}} \cdot Tie \cdot LMTD_{\text{Efecto,I}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto I}$$

$$A_{\text{Efecto,II}} = 1,15 \cdot \frac{\dot{m}_{v1} \cdot \Delta h_{v1} \cdot Pot}{U_{\text{Efecto,II}} \cdot Tie \cdot LMTD_{\text{Efecto,II}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto II}$$

$$A_{\text{Efecto,III}} = 1,15 \cdot \frac{\dot{m}_{v2} \cdot \Delta h_{v2} \cdot Pot}{U_{\text{Efecto,III}} \cdot Tie \cdot LMTD_{\text{Efecto,III}}} \quad \text{Área de transferencia Efecto III}$$





Calculate

**DISEÑO MECÁNICO DE 03 LOS EFECTOS**

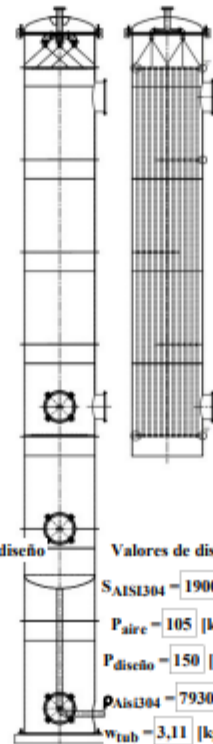
- Área de transferencia
- Longitud de tubos
- Diametro exterior de tubos
- Cantidad de tubos
- Diametro interior de coraza
- Espesor - Costuras largas
- Espesor - circunferenciales
- Altura total de efecto
- Altura del Cuerpo I
- Momento en la base
- Momento en la costura inferior
- Fuerza cortante
- Espesor debido a la presión del viento
- Espesor Final de coraza
- Esfuerzo debido al peso de lo tubos
- Espesor de espejo debido al peso
- Espesor de espejo debido al peso
- Espesor de espejo debido al peso

**EFECTO I**



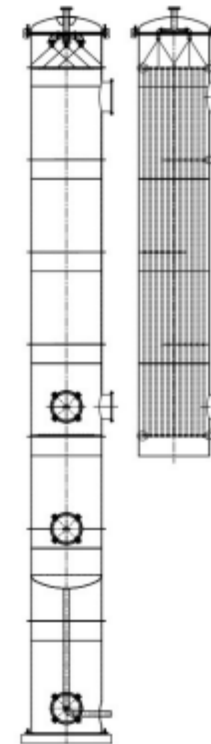
- $A_{Efecto,I} = 2096 \text{ [m}^2\text{]}$
- $L_{Tubo,Efecto,I} = 9 \text{ [m]}$
- $D_{o,EfectoI} = 0,0483 \text{ [m]}$
- $N_{Tubos,Efecto,I} = 1535$
- $D_{Coraza,Efecto,I} = 3,1 \text{ [m]}$
- $t_{c11} = 0,003061 \text{ [m]}$
- $t_{cc1} = 0,001529 \text{ [m]}$
- $H_{Efec,I} = 13,4 \text{ [m]}$
- $h_1 = 3,85 \text{ [m]}$
- $M_1 = 29219 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $M_{T1} = 14841 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $V_1 = 4361 \text{ [kN]}$
- $t_{M1} = 0,01294 \text{ [m]}$
- $t_{s1} = 0,01447 \text{ [m]}$
- $S_{Peso,efectoI} = 55,85 \text{ [kPa]}$
- $t_{esp1} = 0,02381 \text{ [m]}$
- $W_{Total,Efec,I} = 487,2 \text{ [kN]}$
- $S_{Peso.Total,I} = 6,061 \text{ [MPa]}$

**EFECTO II**



- $A_{Efecto,II} = 1046 \text{ [m}^2\text{]}$
- $L_{Tubo,Efecto,II} = 6 \text{ [m]}$
- $D_{o,EfectoII} = 0,0483 \text{ [m]}$
- $N_{Tubos,Efecto,II} = 1149$
- $D_{Coraza,Efecto,II} = 2,682 \text{ [m]}$
- $t_{c12} = 0,002648 \text{ [m]}$
- $t_{cc2} = 0,001323 \text{ [m]}$
- $H_{Efec,II} = 10,4 \text{ [m]}$
- $h_2 = 3,85 \text{ [m]}$
- $M_2 = 15228 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $M_{T2} = 6040 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $V_2 = 2928 \text{ [kN]}$
- $t_{M2} = 0,007036 \text{ [m]}$
- $t_{s2} = 0,008358 \text{ [m]}$
- $S_{Peso,efectoII} = 37,23 \text{ [kPa]}$
- $t_{esp2} = 0,02255 \text{ [m]}$
- $W_{Total,Efec,II} = 234,3 \text{ [kN]}$
- $S_{Peso.Total,II} = 6,202 \text{ [MPa]}$

**EFECTO III**



- $A_{Efecto,III} = 852 \text{ [m}^2\text{]}$
- $L_{Tubo,Efecto,III} = 6 \text{ [m]}$
- $D_{o,EfectoIII} = 0,0483 \text{ [m]}$
- $N_{Tubos,Efecto,III} = 935,8$
- $D_{Coraza,Efecto,III} = 2,42 \text{ [m]}$
- $t_{c13} = 0,00239 \text{ [m]}$
- $t_{cc3} = 0,001194 \text{ [m]}$
- $H_{Efec,III} = 10,4 \text{ [m]}$
- $h_3 = 3,85 \text{ [m]}$
- $M_3 = 13743 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $M_{T3} = 5451 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$
- $V_3 = 2643 \text{ [kN]}$
- $t_{M3} = 0,007795 \text{ [m]}$
- $t_{s3} = 0,008989 \text{ [m]}$
- $S_{Peso,efectoIII} = 37,23 \text{ [kPa]}$
- $t_{esp3} = 0,02035 \text{ [m]}$
- $W_{Total,Efec,III} = 195,3 \text{ [kN]}$
- $S_{Peso.Total,III} = 5,168 \text{ [MPa]}$

Constantes De diseño

- CL = 0,87
- CTP = 0,93
- E = 0,8

Valores de diseño

- $S_{AISI304} = 190000 \text{ [kPa]}$
- $P_{aire} = 105 \text{ [kPa]}$
- $P_{diseño} = 150 \text{ [kPa]}$
- $\rho_{Ais304} = 7930 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- $w_{rub} = 3,11 \text{ [kg/m]}$
- gravedad = 9,81  $[\text{m/s}^2]$

Separación entre tubos (Paso)

$p = 1,5$

Constante dependiente del arreglo

$n = 0,5969$

- 1: "CÁLCULO MECÁNICO"
- 2:
- 3: "Cantidad de tubos por efecto"
- 4: //A\_Efecto\_I=2096
- 5: //A\_Efecto\_II=1046
- 6: //A\_Efecto\_III=852
- 7: //D\_o=0,0483 [m] "Diametro  
exterior del tubo DN40"
- 8: //L\_Tubo\_Efecto\_I=9 [m] "Longitud del  
tubo DN40 Efecto I"
- 9: //L\_Tubo\_Efecto\_II=6 [m] "Longitud del  
tubo DN40 Efecto I"
- 10: //L\_Tubo\_Efecto\_III=6 [m] "Longitud del  
tubo DN40 Efecto I"
- 11:
- 12:  $N_{\text{Tubos Efecto I}} = A_{\text{Efecto I}} / (\pi * D_o * L_{\text{Tubo Efecto I}})$   
"Cantidad de tubos Efecto I"
- 13:  $N_{\text{Tubos Efecto II}} = A_{\text{Efecto II}} / (\pi * D_o * L_{\text{Tubo Efecto II}})$  "Cantidad de  
tubos Efecto II"
- 14:  $N_{\text{Tubos Efecto III}} = A_{\text{Efecto III}} / (\pi * D_o * L_{\text{Tubo Efecto III}})$  "Cantidad de  
tubos Efecto III"
- 15:
- 16: "Diametro de la coraza y espejos fijos"
- 17:
- 18: "CL=0.87 " "Constante  
debido a la distribución de tubos"
- 19: "CTP=0.93" "Constante  
debido al numero de pasos por tubo"
- 20:
- 21: "Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto I"
- 22:  $D_{\text{Coraza Efecto I}} = 0,637 * (((CL/CTP)^{(1/2)} * ((A_{\text{Efecto I}} * (1,5^2) * D_o_{\text{Efecto I}}) / (L_{\text{Tubo Efecto I}}))^{(1/2)})$
- 23: "Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto II"
- 24:  $D_{\text{Coraza Efecto II}} = 0,637 * (((CL/CTP)^{(1/2)} * ((A_{\text{Efecto II}} * (1,5^2) * D_o_{\text{Efecto II}}) / (L_{\text{Tubo Efecto II}}))^{(1/2)})$
- 25: "Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto III"
- 26:  $D_{\text{Coraza Efecto III}} = 0,637 * (((CL/CTP)^{(1/2)} * ((A_{\text{Efecto III}} * (1,5^2) * D_o_{\text{Efecto III}}) / (L_{\text{Tubo Efecto III}}))^{(1/2)})$
- 27:
- 28: "Parametros de diseño mecánico"
- 29: //S\_AISI304=205000 [kpa] "Esfuerzo de fluencia del acero inox 304"
- 30: //P\_diseño=150 [kpa] "Presion de diseño"
- 31: //P\_aire=105 [kpa] "Presion del aire"
- 32: //D\_s1= 2,3 [m] "Diametro de coraza en efecto I"
- 33: //D\_s2= 1,5 [m] "Diametro de coraza en efecto II"
- 34: //D\_s3= 1,6 [m] "Diametro de coraza en efecto II"
- 35: H= 10,4 [m] "Altura de efectos"
- 36: //L\_tubos=6[m] "Logitud de tubos"
- 37: //E=0,8 "Eficiencia de soldadura en las costuras"
- 38:
- 39: "Determinación de espesores por costuras largas"
- 40:
- 41:  $t_{cl1} = (P_{\text{diseño}} * D_{\text{Coraza Efecto I}}) / ((S_{\text{AISI304}} * E) - (0,6 * P_{\text{diseño}}))$  "Efecto I"
- 42:  $t_{cl2} = (P_{\text{diseño}} * D_{\text{Coraza Efecto II}}) / ((S_{\text{AISI304}} * E) - (0,6 * P_{\text{diseño}}))$  "Efecto II"
- 43:  $t_{cl3} = (P_{\text{diseño}} * D_{\text{Coraza Efecto III}}) / ((S_{\text{AISI304}} * E) - (0,6 * P_{\text{diseño}}))$  "Efecto III"
- 44:
- 45: "Determinación de espesores por costuras circunferenciales"
- 46:
- 47:  $t_{cc1} = (P_{\text{diseño}} * D_{\text{Coraza Efecto I}}) / ((2 * S_{\text{AISI304}} * E) + (0,4 * P_{\text{diseño}}))$  "Efecto I"
- 48:  $t_{cc2} = (P_{\text{diseño}} * D_{\text{Coraza Efecto II}}) / ((2 * S_{\text{AISI304}} * E) + (0,4 * P_{\text{diseño}}))$  "Efecto II"

49:  $t_{cc3}=(P_{diseño} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_III}) / ((2 \cdot S_{AISI304} \cdot E) + (0,4 \cdot P_{diseño}))$  "Efecto III"  
 50:  
 51: "Fuerzas cortantes en la superficie exterior de los efectos"  
 52:  
 53: "Fuerza cortante en C.G del efecto I"  
 54:  $V_1=P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_I} \cdot (H_{Efec\_I})$   
 55: "Fuerza cortante en C.G del efecto II"  
 56:  $V_2=P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_II} \cdot (H_{Efec\_II})$   
 57: "Fuerza cortante en C.G del efecto III"  
 58:  $V_3=P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_III} \cdot (H_{Efec\_III})$   
 59:  
 60: "Determinación de momentos en la base"  
 61:  
 62:  $M_1=(P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_I} \cdot H_{Efec\_I} \cdot (H_{Efec\_I} / 2))$  "Momento en base de efecto I"  
 63:  $M_2=(P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_II} \cdot H_{Efec\_II} \cdot (H_{Efec\_II} / 2))$  "Momento en base de efecto II"  
 64:  $M_3=(P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_III} \cdot H_{Efec\_III} \cdot (H_{Efec\_III} / 2))$  "Momento en base de efecto III"  
 65:  
 66: "Determinación de momentos en la costura inferior"  
 67:  
 68:  $M_{T1}=M_1 - h_1 \cdot (V_1 - (0,5 \cdot P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_I} \cdot h_1))$  "Momento en la costura inferior del efecto I"  
 69:  $M_{T2}=M_2 - h_2 \cdot (V_2 - (0,5 \cdot P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_II} \cdot h_2))$  "Momento en la costura inferior del efecto II"  
 70:  $M_{T3}=M_3 - h_3 \cdot (V_3 - (0,5 \cdot P_{aire} \cdot D_{Coraza\_Efecto\_III} \cdot h_3))$  "Momento en la costura inferior del efecto III"  
 71:  
 72: "Determinación de espesores por esfuerzo provocado por el viento"  
 73:  
 74:  $t_{M1}=(M_{T1}) / (((D_{Coraza\_Efecto\_I} / 2)^2) \cdot \pi \cdot S_{AISI304} \cdot E)$  "Efecto I"  
 75:  $t_{M2}=(M_{T2}) / (((D_{Coraza\_Efecto\_II} / 2)^2) \cdot \pi \cdot S_{AISI304} \cdot E)$  "Efecto II"  
 76:  $t_{M3}=(M_{T3}) / (((D_{Coraza\_Efecto\_III} / 2)^2) \cdot \pi \cdot S_{AISI304} \cdot E)$  "Efecto III"  
 77:  
 78: "Espesor final de la coraza"  
 79:  
 80:  $t_{s1}=t_{M1} + t_{cc1}$  "Efecto I"  
 81:  $t_{s2}=t_{M2} + t_{cc2}$  "Efecto II"  
 82:  $t_{s3}=t_{M3} + t_{cc3}$  "Efecto III"  
 83:  
 84: "Esfuerzo debido al peso de los componentes de efecto"  
 85:  
 86:  $W_{co\_1}=(\rho_{Aisi304} \cdot (\pi / 4) \cdot ((D_{Coraza\_Efecto\_I} + t_{M1})^2 - (D_{Coraza\_Efecto\_I})^2) \cdot (gravedad) \cdot H_{Efec\_I}) / (10^3)$  "Peso de la coraza Efecto I"  
 87:  $W_{co\_2}=(\rho_{Aisi304} \cdot (\pi / 4) \cdot ((D_{Coraza\_Efecto\_II} + t_{M2})^2 - (D_{Coraza\_Efecto\_II})^2) \cdot (gravedad) \cdot H_{Efec\_II}) / (10^3)$  "Peso de la coraza Efecto I"  
 88:  $W_{co\_3}=(\rho_{Aisi304} \cdot (\pi / 4) \cdot ((D_{Coraza\_Efecto\_III} + t_{M3})^2 - (D_{Coraza\_Efecto\_III})^2) \cdot (gravedad) \cdot H_{Efec\_III}) / (10^3)$  "Peso de la coraza Efecto I"  
 89:  
 90:  $W_{tu\_1}=(N_{Tubos\_Efecto\_I} \cdot w_{tub} \cdot L_{Tubo\_Efecto\_I} \cdot gravedad) / (10^3)$  "Peso de los tubos del Efecto I"  
 91:  $W_{tu\_2}=(N_{Tubos\_Efecto\_II} \cdot w_{tub} \cdot L_{Tubo\_Efecto\_II} \cdot gravedad) / (10^3)$  "Peso de los tubos del Efecto II"  
 92:  $W_{tu\_3}=(N_{Tubos\_Efecto\_III} \cdot w_{tub} \cdot L_{Tubo\_Efecto\_III} \cdot gravedad) / (10^3)$  "Peso de los tubos del Efecto III"  
 93:  
 94:  $S_{Peso\_efectoI}=(W_{tu\_1}) / ((\pi / 4) \cdot (((D_{Coraza\_Efecto\_I})^2)))$  "Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto I"  
 95:  $S_{Peso\_efectoII}=(W_{tu\_2}) / ((\pi / 4) \cdot (((D_{Coraza\_Efecto\_II})^2)))$  "Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto II"

- 96:  $S\_Peso\_efectoIII=(W\_tu\_3)/((\pi/4)*(((D\_Coraza\_Efecto\_III)^2))))$  *"Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto III"*
- 97:
- 98:  $W\_Total.Efec.I=W\_co\_1+W\_tu\_1$  *"Peso total del Efecto I"*
- 99:  $W\_Total.Efec.II=W\_co\_2+W\_tu\_2$  *"Peso total del Efecto II"*
- 100:  $W\_Total.Efec.III=W\_co\_3+W\_tu\_3$  *"Peso total del Efecto III"*
- 101:
- 102:  $S\_Peso.Total.I=(W\_tu\_1+W\_co\_1)/(((D\_Coraza\_Efecto\_I+t\_M1)^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_I)^2))*10^3$  *"Esfuerzo debido al peso total Efecto I"*
- 103:  $S\_Peso.Total.II=(W\_tu\_2+W\_co\_2)/(((D\_Coraza\_Efecto\_II+t\_M2)^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_II)^2))*10^3$  *"Esfuerzo debido al peso total Efecto II"*
- 104:  $S\_Peso.Total.III=(W\_tu\_3+W\_co\_3)/(((D\_Coraza\_Efecto\_III+t\_M3)^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_III)^2))*10^3$  *"Esfuerzo debido al peso total Efecto III"*
- 105:
- 106: *"Constante que depende del tipo de arreglo"*
- 107:  $n=1-(0,907/(p^2))$
- 108:
- 109: *"Espesor de espejo superior e inferior"*
- 110:  $t\_esp1=((0,8*D\_Coraza\_Efecto\_I)/3)*((P\_diseño-S\_Peso\_efectoI)/(n*S\_AISI304))^{(1/2)}$  *"Espesor espejo efecto I"*
- 111:  $t\_esp2=((0,8*D\_Coraza\_Efecto\_II)/3)*((P\_diseño-S\_Peso\_efectoII)/(n*S\_AISI304))^{(1/2)}$  *"Espesor espejo efecto II"*
- 112:  $t\_esp3=((0,8*D\_Coraza\_Efecto\_III)/3)*((P\_diseño-S\_Peso\_efectoIII)/(n*S\_AISI304))^{(1/2)}$  *"Espesor espejo efecto III"*
- 113:
- 114:
- 115:
- 116:
- 117:

### CÁLCULO MECÁNICO

#### Cantidad de tubos por efecto

$$N_{Tubos;Efecto;I} = \frac{A_{Efecto;I}}{\pi \cdot D_{o;EfectoI} \cdot L_{Tubo;Efecto;I}} \quad \text{Cantidad de tubos Efecto I}$$

$$N_{Tubos;Efecto;II} = \frac{A_{Efecto;II}}{\pi \cdot D_{o;EfectoII} \cdot L_{Tubo;Efecto;II}} \quad \text{Cantidad de tubos Efecto II}$$

$$N_{Tubos;Efecto;III} = \frac{A_{Efecto;III}}{\pi \cdot D_{o;EfectoIII} \cdot L_{Tubo;Efecto;III}} \quad \text{Cantidad de tubos Efecto III}$$

#### Diametro de la coraza y espejos fijos

$$CL=0.87$$

#### Constante debido a la distribución de tubos

$$CTP=0.93$$

#### Constante debido al numero de pasos por tubo

#### Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto I

$$D_{\text{Coraza,Efecto;I}} = 0,637 \cdot \left[ \frac{CL}{CTP} \right]^{[1 / 2]} \cdot \left[ \frac{A_{\text{Efecto;I}} \cdot 1,5^2 \cdot D_{o,\text{Efecto;I}}}{L_{\text{Tubo,Efecto;I}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto II*

$$D_{\text{Coraza,Efecto;II}} = 0,637 \cdot \left[ \frac{CL}{CTP} \right]^{[1 / 2]} \cdot \left[ \frac{A_{\text{Efecto;II}} \cdot 1,5^2 \cdot D_{o,\text{Efecto;II}}}{L_{\text{Tubo,Efecto;II}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Diametro de espejo fijo y coraza de Efecto III*

$$D_{\text{Coraza,Efecto;III}} = 0,637 \cdot \left[ \frac{CL}{CTP} \right]^{[1 / 2]} \cdot \left[ \frac{A_{\text{Efecto;III}} \cdot 1,5^2 \cdot D_{o,\text{Efecto;III}}}{L_{\text{Tubo,Efecto;III}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Parametros de diseño mecánico*

$$H = 10,4 \text{ [m]}$$

*Altura de efectos*

*Determinación de espesores por costuras largas*

$$t_{cl1} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;I}}}{S_{\text{AlSi304}} \cdot E - 0,6 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto I}$$

$$t_{cl2} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;II}}}{S_{\text{AlSi304}} \cdot E - 0,6 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto II}$$

$$t_{cl3} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;III}}}{S_{\text{AlSi304}} \cdot E - 0,6 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto III}$$

*Determinación de espesores por costuras circunferenciales*

$$t_{cc1} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;I}}}{2 \cdot S_{\text{AlSi304}} \cdot E + 0,4 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto I}$$

$$t_{cc2} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;II}}}{2 \cdot S_{\text{AlSi304}} \cdot E + 0,4 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto II}$$

$$t_{cc3} = \frac{P_{\text{diseño}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;III}}}{2 \cdot S_{\text{AlSi304}} \cdot E + 0,4 \cdot P_{\text{diseño}}} \text{ Efecto III}$$

*Fuerzas cortantes en la superficie exterior de los efectos*

*Fuerza cortante en C.G del efecto I*

$$V_1 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;I}} \cdot H_{\text{Efec;I}}$$

*Fuerza cortante en C.G del efecto II*

$$V_2 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza,Efecto;II}} \cdot H_{\text{Efec;II}}$$

*Fuerza cortante en C.G del efecto III*

$$V_3 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;III}} \cdot H_{\text{Efec;III}}$$

#### Determinación de momentos en la base

$$M_1 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;I}} \cdot H_{\text{Efec;I}} \cdot \frac{H_{\text{Efec;I}}}{2} \quad \text{Momento en base de efecto I}$$

$$M_2 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;II}} \cdot H_{\text{Efec;II}} \cdot \frac{H_{\text{Efec;II}}}{2} \quad \text{Momento en base de efecto II}$$

$$M_3 = P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;III}} \cdot H_{\text{Efec;III}} \cdot \frac{H_{\text{Efec;III}}}{2} \quad \text{Momento en base de efecto III}$$

#### Determinación de momentos en la costura inferior

$$M_{T1} = M_1 - h_1 \cdot [V_1 - 0,5 \cdot P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;I}} \cdot h_1] \quad \text{Momento en la costura inferior del efecto I}$$

$$M_{T2} = M_2 - h_2 \cdot [V_2 - 0,5 \cdot P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;II}} \cdot h_2] \quad \text{Momento en la costura inferior del efecto II}$$

$$M_{T3} = M_3 - h_3 \cdot [V_3 - 0,5 \cdot P_{\text{aire}} \cdot D_{\text{Coraza;Efecto;III}} \cdot h_3] \quad \text{Momento en la costura inferior del efecto III}$$

#### Determinación de espesores por esfuerzo provocado por el viento

$$t_{M1} = \frac{M_{T1}}{\left[ \frac{D_{\text{Coraza;Efecto;I}}}{2} \right]^2 \cdot \pi \cdot S_{\text{AISI304}} \cdot E} \quad \text{Efecto I}$$

$$t_{M2} = \frac{M_{T2}}{\left[ \frac{D_{\text{Coraza;Efecto;II}}}{2} \right]^2 \cdot \pi \cdot S_{\text{AISI304}} \cdot E} \quad \text{Efecto II}$$

$$t_{M3} = \frac{M_{T3}}{\left[ \frac{D_{\text{Coraza;Efecto;III}}}{2} \right]^2 \cdot \pi \cdot S_{\text{AISI304}} \cdot E} \quad \text{Efecto III}$$

#### Espesor final de la coraza

$$t_{s1} = t_{M1} + t_{cc1} \quad \text{Efecto I}$$

$$t_{s2} = t_{M2} + t_{cc2} \quad \text{Efecto II}$$

$$t_{s3} = t_{M3} + t_{cc3} \quad \text{Efecto III}$$

#### Esfuerzo debido al peso de los componentes de efecto

$$W_{co;1} = \frac{\rho_{\text{AISI304}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(D_{\text{Coraza;Efecto;I}} + t_{M1})^2 - D_{\text{Coraza;Efecto;I}}^2] \cdot \text{gravedad} \cdot H_{\text{Efec;I}}}{10^3}$$

#### Peso de la coraza Efecto I

$$W_{co;2} = \frac{\rho_{\text{AISI304}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(D_{\text{Coraza;Efecto;II}} + t_{M2})^2 - D_{\text{Coraza;Efecto;II}}^2] \cdot \text{gravedad} \cdot H_{\text{Efec;II}}}{10^3}$$

Peso de la coraza Efecto I

$$W_{co;3} = \frac{\rho_{Aisi304} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(D_{Coraza;Efecto;III} + t_{M3})^2 - D_{Coraza;Efecto;III}^2] \cdot gravedad \cdot H_{Efec;III}}{10^3}$$

Peso de la coraza Efecto I

$$W_{tu;1} = \frac{N_{Tubos;Efecto;I} \cdot W_{tub} \cdot L_{Tubo;Efecto;I} \cdot gravedad}{10^3} \quad \text{Peso de los tubos del Efecto I}$$

$$W_{tu;2} = \frac{N_{Tubos;Efecto;II} \cdot W_{tub} \cdot L_{Tubo;Efecto;II} \cdot gravedad}{10^3} \quad \text{Peso de los tubos del Efecto II}$$

$$W_{tu;3} = \frac{N_{Tubos;Efecto;III} \cdot W_{tub} \cdot L_{Tubo;Efecto;III} \cdot gravedad}{10^3} \quad \text{Peso de los tubos del Efecto III}$$

$$S_{Peso;efectoI} = \frac{W_{tu;1}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{Coraza;Efecto;I}^2} \quad \text{Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto I}$$

$$S_{Peso;efectoII} = \frac{W_{tu;2}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{Coraza;Efecto;II}^2} \quad \text{Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto II}$$

$$S_{Peso;efectoIII} = \frac{W_{tu;3}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{Coraza;Efecto;III}^2} \quad \text{Esfuerzo debido al peso de los tubos Efecto III}$$

$$W_{Total.Efec.I} = W_{co;1} + W_{tu;1}$$

Peso total del Efecto I

$$W_{Total.Efec.II} = W_{co;2} + W_{tu;2}$$

Peso total del Efecto II

$$W_{Total.Efec.III} = W_{co;3} + W_{tu;3}$$

Peso total del Efecto III

$$S_{Peso.Total.I} = \frac{W_{tu;1} + W_{co;1}}{[(D_{Coraza;Efecto;I} + t_{M1})^2 - D_{Coraza;Efecto;I}^2] \cdot 10^3}$$

Esfuerzo debido al peso total Efecto I

$$S_{Peso.Total.II} = \frac{W_{tu;2} + W_{co;2}}{[(D_{Coraza;Efecto;II} + t_{M2})^2 - D_{Coraza;Efecto;II}^2] \cdot 10^3}$$

Esfuerzo debido al peso total Efecto II

$$S_{\text{Peso.Total.III}} = \frac{W_{\text{tu},3} + W_{\text{co},3}}{[(D_{\text{Coraza,Efecto,III}} + t_{M3})^2 - D_{\text{Coraza,Efecto,III}}^2] \cdot 10^{-3}}$$

*Esfuerzo debido al peso total Efecto III*

*Constante que depende del tipo de arreglo*

$$n = 1 - \frac{0,907}{p^2}$$

*Espesor de espejo superior e inferior*

$$t_{\text{esp1}} = \frac{0,8 \cdot D_{\text{Coraza,Efecto,I}}}{3} \cdot \left[ \frac{P_{\text{diseño}} - S_{\text{Peso,efectoI}}}{n \cdot S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Espesor espejo efecto I*

$$t_{\text{esp2}} = \frac{0,8 \cdot D_{\text{Coraza,Efecto,II}}}{3} \cdot \left[ \frac{P_{\text{diseño}} - S_{\text{Peso,efectoII}}}{n \cdot S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Espesor espejo efecto II*

$$t_{\text{esp3}} = \frac{0,8 \cdot D_{\text{Coraza,Efecto,III}}}{3} \cdot \left[ \frac{P_{\text{diseño}} - S_{\text{Peso,efectoIII}}}{n \cdot S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]}$$

*Espesor espejo efecto III*



**DISEÑO MECÁNICO DE 03 LOS EFECTOS**

Calculate

Diametro interior de coraza  
 $l_2$  distancia (Ver Anexo 7, Tabla D)  
 $l_3$  distancia (Ver Anexo 7, Tabla D)  
 Espesor de coraza  
 Momento por la presión de aire  
 Peso del equipo

**CÁLCULO DE PERNOS DE ANCLAJE**

Área de circunferencia de pernos de anclaje  
 Tensión Maxima  
 Cantida de pernos  
 Área de pernos ASTM193 B16  
 Tensión Maxima

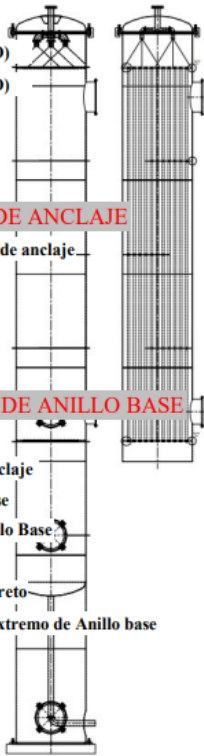
**CÁLCULO DE ESPESOR DE ANILLO BASE**

Constantes en base al valor K  
 D. circunferencia de pernos de anclaje  
 Tensión Maxima Sobre Anillo Base  
 Fuerza de Compresión Sobre Anillo Base  
 Ancho de Anillo  
 Esfuerzo Compresión Sobre Concreto  
 Esfuerzo Max. compresión en el extremo de Anillo base  
 Espesor de Anillo Base

Valores de diseño

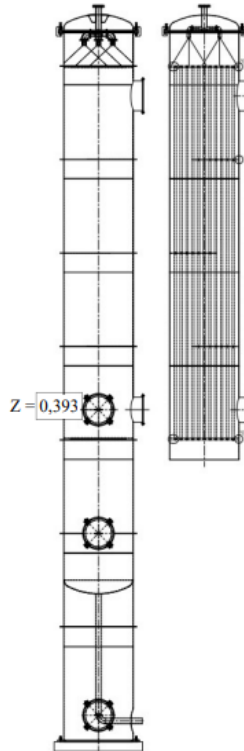
$S_{AISI304} = 195000$  [kPa]  
 $S_{ASTM193.B16} = 305000$  [kPa]  
 $t_{pestaña} = 0,0381$  [m]

**EFECTO I**



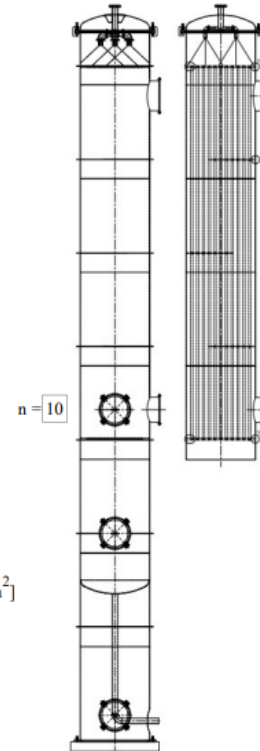
$D_{Coraza,Efecto,I} = 3,1$  [m]  
 $l_{2,Efec,I} = 0,07$  [m]  
 $l_{3,Efec,I} = 0,06$  [m]  
 $t_{s1} = 0,015$  [m]  
 $M_1 = 29219$  [kN.m]  
 $W_1 = 486$  [kN]  
  
 $A_{B,Efecto,I} = 1,331$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,I} = 10824$  [kN/m]  
 $N_{Per,I} = 20$   
 $B_{A,I} = 0,001934$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,I} = 10824$  [kN/m]  
  
 $k = 0,5$   
 $D_{C.Pernos,I} = 3,27$  [m]  
 $T_{max.A.Base,I} = 11139$  [kN]  
 $F_{Comp,max,I} = 11625$  [kN]  
 $l_{4,Efec,I} = 0,1781$  [m]  
 $S_{Comp,Efec,I} = 15586$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $S_{Max.Comp,Efec,I} = 16459$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $t_{A.Base,Efec,I} = 0,03777$  [m]

**EFECTO II**



$D_{Coraza,Efecto,II} = 2,7$  [m]  
 $l_{2,Efec,II} = 0,064$  [m]  
 $l_{3,Efec,II} = 0,05$  [m]  
 $t_{s2} = 0,009$  [m]  
 $M_2 = 15228$  [kN.m]  
 $W_2 = 275$  [kN]  
  
 $A_{B,Efecto,II} = 1,014$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,II} = 7410$  [kN/m]  
 $N_{Per,II} = 18$   
 $B_{A,II} = 0,001281$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,II} = 7410$  [kN/m]  
  
 $j = 0,785$   
 $D_{C.Pernos,II} = 2,846$  [m]  
 $T_{max.A.Base,II} = 6678$  [kN]  
 $F_{Comp,max,II} = 6953$  [kN]  
 $l_{4,Efec,II} = 0,1561$  [m]  
 $S_{Comp,Efec,II} = 11855$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $S_{Max.Comp,Efec,II} = 12526$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $t_{A.Base,Efec,II} = 0,02889$  [m]

**EFECTO III**



$D_{Coraza,Efecto,III} = 2,5$  [m]  
 $l_{2,Efec,III} = 0,064$  [m]  
 $l_{3,Efec,III} = 0,05$  [m]  
 $t_{s3} = 0,009$  [m]  
 $M_3 = 13743$  [kN.m]  
 $W_3 = 195$  [kN]  
  
 $A_{B,Efecto,III} = 0,9426$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,III} = 7216$  [kN/m]  
 $N_{Per,III} = 14$   
 $B_{A,III} = 0,001491$  [m<sup>2</sup>]  
 $T_{max,III} = 7216$  [kN/m]  
  
 $c_c = 2$   
 $D_{C.Pernos,III} = 2,646$  [m]  
 $T_{max.A.Base,III} = 6519$  [kN]  
 $F_{Comp,max,III} = 6714$  [kN]  
 $l_{4,Efec,III} = 0,1561$  [m]  
 $S_{Comp,Efec,III} = 12311$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $S_{Max.Comp,Efec,III} = 13061$  [kN/m<sup>2</sup>]  
 $t_{A.Base,Efec,III} = 0,0295$  [m]

**"CÁLCULO MECÁNICO - ANCLAJES Y ANILLO BASE"**

**"Área de la circunferencia de pernos o del anillo base de anclaje"**

$$A\_B\_Efecto\_I=(\pi/4)*(((D\_Coraza\_Efecto\_I+(2*t\_s1)+(2*(l\_2\_Efec\_I)))+(2*(l\_3\_Efec\_I)))^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_I+2*t\_s1)^2))$$

Efecto I"

$$A\_B\_Efecto\_II=(\pi/4)*(((D\_Coraza\_Efecto\_II+(2*t\_s2)+(2*(l\_2\_Efec\_II)))+(2*(l\_3\_Efec\_II)))^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_II+2*t\_s2)^2))$$

"Efecto II"

$$A\_B\_Efecto\_III=(\pi/4)*(((D\_Coraza\_Efecto\_III+(2*t\_s3)+(2*(l\_2\_Efec\_III)))+(2*(l\_3\_Efec\_III)))^2)-((D\_Coraza\_Efecto\_III+2*t\_s3)^2))$$

"Efecto III"

**"Tensión máxima en la circunferencia de pernos"**

$$T\_max\_I=(M\_1/(2*A\_B\_Efecto\_I))-(W\_1/(D\_Coraza\_Efecto\_I+(2*t\_s1)+(2*(l\_2\_Efec\_I))))$$

"Efecto I"

$$T\_max\_II=(M\_2/(2*A\_B\_Efecto\_II))-(W\_2/(D\_Coraza\_Efecto\_II+(2*t\_s2)+(2*(l\_2\_Efec\_II))))$$

"Efecto II"

$$T\_max\_III=(M\_3/(2*A\_B\_Efecto\_III))-(W\_3/(D\_Coraza\_Efecto\_III+(2*t\_s3)+(2*(l\_2\_Efec\_III))))$$

"Efecto III"

**"Área requerida en pernos de anclaje"**

$$B\_A\_I=(T\_max\_I*(D\_Coraza\_Efecto\_I+(2*t\_s1)+(2*(l\_2\_Efec\_I))))/(3*S\_ASTM193.B16*N\_Per\_I)$$

"Efecto I"

$$B\_A\_II=(T\_max\_II*(D\_Coraza\_Efecto\_II+(2*t\_s2)+(2*(l\_2\_Efec\_II))))/(3*S\_ASTM193.B16*N\_Per\_II)$$

"Efecto II"

$$B\_A\_III=(T\_max\_III*(D\_Coraza\_Efecto\_III+(2*t\_s3)+(2*(l\_2\_Efec\_III))))/(3*S\_ASTM193.B16*N\_Per\_III)$$

"Efecto III"

**"Tensión Máxima Sobre Anillo Base"**

$$D\_C.Pernos.I=D\_Coraza\_Efecto\_I+t\_s1+t\_s1+l\_2\_Efec\_I+l\_2\_Efec\_I$$

"Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto I"

$$D\_C.Pernos.II=D\_Coraza\_Efecto\_II+t\_s2+t\_s2+l\_2\_Efec\_II+l\_2\_Efec\_II$$

"Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto II"

$$D\_C.Pernos.III=D\_Coraza\_Efecto\_III+t\_s3+t\_s3+l\_2\_Efec\_III+l\_2\_Efec\_III$$

"Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto III"

$$T\_max.A.Base.I=(M\_1-(W\_1*Z*D\_C.Pernos.I))/(j*D\_C.Pernos.I)$$

"Efecto I"

$$T\_max.A.Base.II=(M\_2-(W\_2*Z*D\_C.Pernos.II))/(j*D\_C.Pernos.II)$$

"Efecto II"

$$T\_max.A.Base.III=(M\_3-(W\_3*Z*D\_C.Pernos.III))/(j*D\_C.Pernos.III)$$

"Efecto III"

**"Fuerza Máxima de Compresión Sobre Anillo Base"**

$$F\_Comp.max.I=T\_max.A.Base.I+W\_1$$

"Efecto I"

$$F\_Comp.max.II=T\_max.A.Base.II+W\_2$$

"Efecto II"

$$F\_Comp.max.III=T\_max.A.Base.III+W\_3$$

"Efecto III"

**"Ancho de Anillo Base"**

$$l\_4.Efec.I=(t\_s1)+(l\_2\_Efec\_I)+(l\_3\_Efec\_I+t\_pestaña)-0,005$$

"Efecto I"

$$l\_4.Efec.II=(t\_s2)+(l\_2\_Efec\_II)+(l\_3\_Efec\_II+t\_pestaña)-0,005$$

"Efecto II"

$$l\_4.Efec.III=(t\_s3)+(l\_2\_Efec\_III)+(l\_3\_Efec\_III+t\_pestaña)-0,005$$

"Efecto III"

**"Esfuerzo de Compresión del Anillo Base Sobre el Concreto"**

$$S\_Comp.Efec.I=F\_Comp.max.I/((l\_4.Efec.I+(n*0,005))*(D\_C.Pernos.I/2)*C\_c)$$

"Efecto I"

$$S\_Comp.Efec.II=F\_Comp.max.II/((l\_4.Efec.II+(n*0,005))*(D\_C.Pernos.II/2)*C\_c)$$

"Efecto II"

$$S\_Comp.Efec.III=F\_Comp.max.III/((l\_4.Efec.III+(n*0,005))*(D\_C.Pernos.III/2)*C\_c)$$

"Efecto III"

**"Esfuerzo Máximo de Compresión en el extremo del Anillo Base Sobre el Concreto"**

$$S\_Max.Comp.Efec.I=S\_Comp.Efec.I*((2*k*D\_C.Pernos.I+l\_4.Efec.I+0,005)/(2*k*D\_C.Pernos.I))$$

"Efecto I"

$$S\_Max.Comp.Efec.II=S\_Comp.Efec.II*((2*k*D\_C.Pernos.II+l\_4.Efec.II+0,005)/(2*k*D\_C.Pernos.II))$$

"Efecto II"

$$S\_Max.Comp.Efec.III=S\_Comp.Efec.III*((2*k*D\_C.Pernos.III+l\_4.Efec.III+0,005)/(2*k*D\_C.Pernos.III))$$

"Efecto III"

**"Espesor de Anillo Base"**

$$t\_A.Base.Efec.I=(l\_2\_Efec\_I+l\_3\_Efec\_I)*((S\_Max.Comp.Efec.I/S\_AIS1304)^(1/2))$$

"Efecto I"

$$t\_A.Base.Efec.II=(l\_2\_Efec\_II+l\_3\_Efec\_II)*((S\_Max.Comp.Efec.II/S\_AIS1304)^(1/2))$$

"Efecto II"

$$t\_A.Base.Efec.III=(l\_2\_Efec\_III+l\_3\_Efec\_III)*((S\_Max.Comp.Efec.III/S\_AIS1304)^(1/2))$$

"Efecto III"

**CÁLCULO MECÁNICO - ANCLAJES Y ANILLO BASE****Área de la circunferencia de pernos o del anillo base de anclaje**

$$A_{B,Efecto,I} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot l_{2,Efec,I} + 2 \cdot l_{3,Efec,I})^2 - (D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1})^2 \right] \text{ Efecto I}$$

$$A_{B,Efecto,II} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot l_{2,Efec,II} + 2 \cdot l_{3,Efec,II})^2 - (D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2})^2 \right] \text{ Efecto II}$$

$$A_{B,Efecto,III} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot l_{2,Efec,III} + 2 \cdot l_{3,Efec,III})^2 - (D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3})^2 \right] \text{ Efecto III}$$

**Tensión máxima en la circunferencia de pernos**

$$T_{max,I} = \frac{M_1}{2 \cdot A_{B,Efecto,I}} - \left[ \frac{W_1}{D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot l_{2,Efec,I}} \right] \text{ Efecto I}$$

$$T_{max,II} = \frac{M_2}{2 \cdot A_{B,Efecto,II}} - \left[ \frac{W_2}{D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot l_{2,Efec,II}} \right] \text{ Efecto II}$$

$$T_{max,III} = \frac{M_3}{2 \cdot A_{B,Efecto,III}} - \left[ \frac{W_3}{D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot l_{2,Efec,III}} \right] \text{ Efecto III}$$

**Área requerida en pernos de anclaje**

$$B_{A,I} = \frac{T_{max,I} \cdot [D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot l_{2,Efec,I}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B16} \cdot N_{Per,I}} \text{ Efecto I}$$

$$B_{A,II} = \frac{T_{max,II} \cdot [D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot l_{2,Efec,II}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B16} \cdot N_{Per,II}} \text{ Efecto II}$$

$$B_{A,III} = \frac{T_{max,III} \cdot [D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot l_{2,Efec,III}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B16} \cdot N_{Per,III}} \text{ Efecto III}$$

**Tensión Máxima Sobre Anillo Base**

$$D_{C,Pernos,I} = D_{Coraza,Efecto,I} + t_{s1} + t_{s1} + l_{2,Efec,I} + l_{2,Efec,I} \text{ Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto I}$$

$$D_{C,Pernos,II} = D_{Coraza,Efecto,II} + t_{s2} + t_{s2} + l_{2,Efec,II} + l_{2,Efec,II} \text{ Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto II}$$

$$D_{C,Pernos,III} = D_{Coraza,Efecto,III} + t_{s3} + t_{s3} + l_{2,Efec,III} + l_{2,Efec,III} \text{ Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto III}$$

$$T_{max,A.Base,I} = \frac{M_1 - W_1 \cdot Z \cdot D_{C,Pernos,I}}{j \cdot D_{C,Pernos,I}} \text{ Efecto I}$$

$$T_{max,A.Base,II} = \frac{M_2 - W_2 \cdot Z \cdot D_{C,Pernos,II}}{j \cdot D_{C,Pernos,II}} \text{ Efecto II}$$

$$T_{max,A.Base,III} = \frac{M_3 - W_3 \cdot Z \cdot D_{C,Pernos,III}}{j \cdot D_{C,Pernos,III}} \text{ Efecto III}$$

**Fuerza Máxima de Compresión Sobre Anillo Base**

$$F_{Comp,max,I} = T_{max,A.Base,I} + W_1 \text{ Efecto I}$$

$$F_{\text{Comp.max.II}} = T_{\text{max.A.Base.II}} + W_2 \quad \text{Efecto II}$$

$$F_{\text{Comp.max.III}} = T_{\text{max.A.Base.III}} + W_3 \quad \text{Efecto III}$$

#### Ancho de Anillo Base

$$I_{4,\text{Efec.I}} = t_{s1} + I_{2,\text{Efec.I}} + I_{3,\text{Efec.I}} + t_{\text{pestaña}} - 0,005 \quad \text{Efecto I}$$

$$I_{4,\text{Efec.II}} = t_{s2} + I_{2,\text{Efec.II}} + I_{3,\text{Efec.II}} + t_{\text{pestaña}} - 0,005 \quad \text{Efecto II}$$

$$I_{4,\text{Efec.III}} = t_{s3} + I_{2,\text{Efec.III}} + I_{3,\text{Efec.III}} + t_{\text{pestaña}} - 0,005 \quad \text{Efecto III}$$

#### Esfuerzo de Compresión del Anillo Base Sobre el Concreto

$$S_{\text{Comp.Efec.I}} = \frac{F_{\text{Comp.max.I}}}{[I_{4,\text{Efec.I}} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{\text{C.Pernos.I}}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto I}$$

$$S_{\text{Comp.Efec.II}} = \frac{F_{\text{Comp.max.II}}}{[I_{4,\text{Efec.II}} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{\text{C.Pernos.II}}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto II}$$

$$S_{\text{Comp.Efec.III}} = \frac{F_{\text{Comp.max.III}}}{[I_{4,\text{Efec.III}} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{\text{C.Pernos.III}}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto III}$$

#### Esfuerzo Maximo de Compresión en el extremo del Anillo Base Sobre el Concreto

$$S_{\text{Max.Comp.Efec.I}} = S_{\text{Comp.Efec.I}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.I}} + I_{4,\text{Efec.I}} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.I}}} \right] \quad \text{Efecto I}$$

$$S_{\text{Max.Comp.Efec.II}} = S_{\text{Comp.Efec.II}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.II}} + I_{4,\text{Efec.II}} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.II}}} \right] \quad \text{Efecto II}$$

$$S_{\text{Max.Comp.Efec.III}} = S_{\text{Comp.Efec.III}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.III}} + I_{4,\text{Efec.III}} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{\text{C.Pernos.III}}} \right] \quad \text{Efecto III}$$

#### Espesor de Anillo Base

$$t_{\text{A.Base.Efec.I}} = [I_{2,\text{Efec.I}} + I_{3,\text{Efec.I}}] \cdot \left[ \frac{S_{\text{Max.Comp.Efec.I}}}{S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto I}$$

$$t_{\text{A.Base.Efec.II}} = [I_{2,\text{Efec.II}} + I_{3,\text{Efec.II}}] \cdot \left[ \frac{S_{\text{Max.Comp.Efec.II}}}{S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto II}$$

$$t_{\text{A.Base.Efec.III}} = [I_{2,\text{Efec.III}} + I_{3,\text{Efec.III}}] \cdot \left[ \frac{S_{\text{Max.Comp.Efec.III}}}{S_{\text{AISI304}}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto III}$$

**DISEÑO MECÁNICO DE 03 LOS EFECTOS**

**EFFECTO I**

Diametro interior de coraza  $D_{Coraza,Efecto,I} = 3,1$  [m]

$l_2$  distancia (Ver Anexo 7, Tabla D)  $l_{2,Efec,I} = 0,064$  [m]

$l_3$  distancia (Ver Anexo 7, Tabla D)  $l_{3,Efec,I} = 0,05$  [m]

Espesor de coraza  $t_{s1} = 0,015$  [m]

Momento en la Costura  $M_{T1} = 14841$  [kN.m]

Peso del equipo  $W_1 = 486$  [kN]

**CÁLCULO DE PERNOS DE ANCLAJE ENTRE CUERPOS**

Área de circunferencia de pernos de anclaje  $A_{B,Efecto,I} = 1,162$  [m<sup>2</sup>]

Tensión Maxima  $T_{max,I} = 6238$  [kN/m]

Cantida de pernos  $N_{Per,I} = 20$

Área de pernos ASTM193 B7  $B_{A,I} = 0,001411$  [m<sup>2</sup>]

Tensión Maxima  $T_{max,I} = 6238$  [kN/m]

**CÁLCULO DE ESPESOR DE ANILLO ENTRE CUERPO I Y CUERPO II DEL EFECTO**

Constantes en base al valor K  $k = 0,451$

D. circunferencia de pernos de anclaje  $D_{C,Pernos,I} = 3,258$  [m]

Tensión Maxima Juntas Bridadas  $T_{max,A,Base,I} = 5553$  [kN]

Fuerza de Compresión Sobre Juntas Bridadas  $F_{Comp,max,I} = 6039$  [kN]

Ancho de Anillo de Juntas Bridadas  $l_{4,Efec,I} = 0,1621$  [m]

Esfuerzo Compresión Sobre Acero AISI304  $S_{Comp,Efec,I} = 11761$  [kN/m<sup>2</sup>]

Esfuerzo Max. compresión en el extremo de Anillo  $S_{Max,Comp,Efec,I} = 12430$  [kN/m<sup>2</sup>]

Espesor de Anillo de juntas bridadas  $t_{A,Base,Efec,I} = 0,02878$  [m]

Valores de diseño

$S_{AISI304} = 195000$  [kPa]

$S_{ASTM193,B7} = 240000$  [kPa]

$t_{pestaña} = 0,0381$  [m]

**EFFECTO II**

$D_{Coraza,Efecto,II} = 2,7$  [m]

$l_{2,Efec,II} = 0,05$  [m]

$l_{3,Efec,II} = 0,038$  [m]

$t_{s2} = 0,009$  [m]

$M_{T2} = 6040$  [kN.m]

$W_2 = 275$  [kN]

$A_{B,Efecto,II} = 0,7757$  [m<sup>2</sup>]

$T_{max,II} = 3795$  [kN/m]

$N_{Per,II} = 18$

$B_{A,II} = 0,0008253$  [m<sup>2</sup>]

$T_{max,II} = 3795$  [kN/m]

$j = 0,785$

$D_{C,Pernos,II} = 2,818$  [m]

$T_{max,A,Base,II} = 2589$  [kN]

$F_{Comp,max,II} = 2864$  [kN]

$l_{4,Efec,II} = 0,1301$  [m]

$S_{Comp,Efec,II} = 7974$  [kN/m<sup>2</sup>]

$S_{Max,Comp,Efec,II} = 8398$  [kN/m<sup>2</sup>]

$t_{A,Base,Efec,II} = 0,01826$  [m]

**EFFECTO III**

$D_{Coraza,Efecto,III} = 2,5$  [m]

$l_{2,Efec,III} = 0,05$  [m]

$l_{3,Efec,III} = 0,038$  [m]

$t_{s3} = 0,009$  [m]

$M_{T3} = 5451$  [kN.m]

$W_3 = 195$  [kN]

$A_{B,Efecto,III} = 0,7205$  [m<sup>2</sup>]

$T_{max,III} = 3709$  [kN/m]

$N_{Per,III} = 18$

$B_{A,III} = 0,0007491$  [m<sup>2</sup>]

$T_{max,III} = 3709$  [kN/m]

$C_c = 1,884$

$D_{C,Pernos,III} = 2,618$  [m]

$T_{max,A,Base,III} = 2552$  [kN]

$F_{Comp,max,III} = 2747$  [kN]

$l_{4,Efec,III} = 0,1301$  [m]

$S_{Comp,Efec,III} = 8233$  [kN/m<sup>2</sup>]

$S_{Max,Comp,Efec,III} = 8704$  [kN/m<sup>2</sup>]

$t_{A,Base,Efec,III} = 0,01859$  [m]

- 1: "CÁLCULO MECÁNICO - ANCLAJES Y ANILLO BASE"
- 2:
- 3: "Área de la circunferencia de pernos o del anillo base de anclaje"
- 4:
- 5:  $A_{B\_Efecto\_I} = (\pi/4) * (((D_{Coraza\_Efecto\_I} + (2*t_{s1}) + (2*(l_{2\_Efec\_I})) + (2*(l_{3\_Efec\_I})))^2 - ((D_{Coraza\_Efecto\_I} + 2*t_{s1})^2))$  "Efecto I"
- 6:  $A_{B\_Efecto\_II} = (\pi/4) * (((D_{Coraza\_Efecto\_II} + (2*t_{s2}) + (2*(l_{2\_Efec\_II})) + (2*(l_{3\_Efec\_II})))^2 - ((D_{Coraza\_Efecto\_II} + 2*t_{s2})^2))$  "Efecto II"
- 7:  $A_{B\_Efecto\_III} = (\pi/4) * (((D_{Coraza\_Efecto\_III} + (2*t_{s3}) + (2*(l_{2\_Efec\_III})) + (2*(l_{3\_Efec\_III})))^2 - ((D_{Coraza\_Efecto\_III} + 2*t_{s3})^2))$  "Efecto III"
- 8:
- 9: "Tensión máxima en la circunferencia de pernos"
- 10:
- 11:  $T_{max\_I} = (M_{T1} / (2*A_{B\_Efecto\_I})) - (W_1 / (D_{Coraza\_Efecto\_I} + (2*t_{s1}) + (2*(l_{2\_Efec\_I}))))$  "Efecto I"
- 12:  $T_{max\_II} = (M_{T2} / (2*A_{B\_Efecto\_II})) - (W_2 / (D_{Coraza\_Efecto\_II} + (2*t_{s2}) + (2*(l_{2\_Efec\_II}))))$  "Efecto II"
- 13:  $T_{max\_III} = (M_{T3} / (2*A_{B\_Efecto\_III})) - (W_3 / (D_{Coraza\_Efecto\_III} + (2*t_{s3}) + (2*(l_{2\_Efec\_III}))))$  "Efecto III"
- 14:
- 15:
- 16: "Área requerida en pernos de anclaje"
- 17:
- 18:  $B_{A\_I} = (T_{max\_I} * (D_{Coraza\_Efecto\_I} + (2*t_{s1}) + (2*(l_{2\_Efec\_I})))) / (3*S_{ASTM193.B7*N_{Per\_I}})$  "Efecto I"
- 19:  $B_{A\_II} = (T_{max\_II} * (D_{Coraza\_Efecto\_II} + (2*t_{s2}) + (2*(l_{2\_Efec\_II})))) / (3*S_{ASTM193.B7*N_{Per\_II}})$  "Efecto II"
- 20:  $B_{A\_III} = (T_{max\_III} * (D_{Coraza\_Efecto\_III} + (2*t_{s3}) + (2*(l_{2\_Efec\_III})))) / (3*S_{ASTM193.B7*N_{Per\_III}})$  "Efecto III"
- 21:
- 22: "Tensión Máxima Sobre Anillo Base"
- 23:
- 24:  $D_{C.Pernos.I} = D_{Coraza\_Efecto\_I} + t_{s1} + t_{s1} + l_{2\_Efec\_I} + l_{2\_Efec\_I}$  "Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto I"
- 25:  $D_{C.Pernos.II} = D_{Coraza\_Efecto\_II} + t_{s2} + t_{s2} + l_{2\_Efec\_II} + l_{2\_Efec\_II}$  "Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto II"
- 26:  $D_{C.Pernos.III} = D_{Coraza\_Efecto\_III} + t_{s3} + t_{s3} + l_{2\_Efec\_III} + l_{2\_Efec\_III}$  "Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto III"
- 27:
- 28:  $T_{max.A.Base.I} = (M_{T1} - (W_1 * Z * D_{C.Pernos.I})) / (j * D_{C.Pernos.I})$  "Efecto I"
- 29:  $T_{max.A.Base.II} = (M_{T2} - (W_2 * Z * D_{C.Pernos.II})) / (j * D_{C.Pernos.II})$  "Efecto II"
- 30:  $T_{max.A.Base.III} = (M_{T3} - (W_3 * Z * D_{C.Pernos.III})) / (j * D_{C.Pernos.III})$  "Efecto III"
- 31:
- 32: "Fuerza Máxima de Compresión Sobre Anillo Base"
- 33:
- 34:  $F_{Comp.max.I} = T_{max.A.Base.I} + W_1$  "Efecto I"
- 35:  $F_{Comp.max.II} = T_{max.A.Base.II} + W_2$  "Efecto II"
- 36:  $F_{Comp.max.III} = T_{max.A.Base.III} + W_3$  "Efecto III"
- 37:
- 38: "Ancho de Anillo Base"
- 39:
- 40:  $l_{4.Efec.I} = (t_{s1}) + (l_{2\_Efec\_I}) + (l_{3\_Efec\_I} + t_{pestaña}) - 0,005$  "Efecto I"
- 41:  $l_{4.Efec.II} = (t_{s2}) + (l_{2\_Efec\_II}) + (l_{3\_Efec\_II} + t_{pestaña}) - 0,005$  "Efecto II"
- 42:  $l_{4.Efec.III} = (t_{s3}) + (l_{2\_Efec\_III}) + (l_{3\_Efec\_III} + t_{pestaña}) - 0,005$  "Efecto III"
- 43:
- 44: "Esfuerzo de Compresión del Anillo Base Sobre el Concreto"
- 45:
- 46:  $S_{Comp.Efec.I} = F_{Comp.max.I} / ((l_{4.Efec.I} + (n * 0,005)) * (D_{C.Pernos.I} / 2) * C_c)$  "Efecto I"
- 47:  $S_{Comp.Efec.II} = F_{Comp.max.II} / ((l_{4.Efec.II} + (n * 0,005)) * (D_{C.Pernos.II} / 2) * C_c)$  "Efecto II"
- 48:  $S_{Comp.Efec.III} = F_{Comp.max.III} / ((l_{4.Efec.III} + (n * 0,005)) * (D_{C.Pernos.III} / 2) * C_c)$  "Efecto III"
- 49:
- 50: "Esfuerzo Máximo de Compresión en el extremo del Anillo Base Sobre el Concreto"
- 51:

- 52:  $S\_Max.Comp.Efec.I = S\_Comp.Efec.I * ((2 * k * D\_C.Pernos.I + I\_4.Efec.I + 0,005) / (2 * k * D\_C.Pernos.I))$  "Efecto I"  
 53:  $S\_Max.Comp.Efec.II = S\_Comp.Efec.II * ((2 * k * D\_C.Pernos.II + I\_4.Efec.II + 0,005) / (2 * k * D\_C.Pernos.II))$  "Efecto II"  
 54:  $S\_Max.Comp.Efec.III = S\_Comp.Efec.III * ((2 * k * D\_C.Pernos.III + I\_4.Efec.III + 0,005) / (2 * k * D\_C.Pernos.III))$  "Efecto III"  
 55:  
 56: "Espesor de Anillo Base"  
 57:  
 58:  $t\_A.Base.Efec.I = (I\_2\_Efec\_I + I\_3\_Efec\_I) * ((S\_Max.Comp.Efec.I / S\_AISI304)^(1/2))$  "Efecto I"  
 59:  $t\_A.Base.Efec.II = (I\_2\_Efec\_II + I\_3\_Efec\_II) * ((S\_Max.Comp.Efec.II / S\_AISI304)^(1/2))$  "Efecto II"  
 60:  $t\_A.Base.Efec.III = (I\_2\_Efec\_III + I\_3\_Efec\_III) * ((S\_Max.Comp.Efec.III / S\_AISI304)^(1/2))$  "Efecto III"  
 61:  
 62:  
 63:  
 64:  
 65:

### CÁLCULO MECÁNICO - ANCLAJES Y ANILLO BASE

#### Área de la circunferencia de pernos o del anillo base de anclaje

$$A_{B,Efecto,I} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot I_{2,Efec,I} + 2 \cdot I_{3,Efec,I})^2 - (D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1})^2 \right] \text{ Efecto I}$$

$$A_{B,Efecto,II} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot I_{2,Efec,II} + 2 \cdot I_{3,Efec,II})^2 - (D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2})^2 \right] \text{ Efecto II}$$

$$A_{B,Efecto,III} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot I_{2,Efec,III} + 2 \cdot I_{3,Efec,III})^2 - (D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3})^2 \right] \text{ Efecto III}$$

#### Tensión máxima en la circunferencia de pernos

$$T_{max,I} = \frac{M_{T1}}{2 \cdot A_{B,Efecto,I}} - \left[ \frac{W_1}{D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot I_{2,Efec,I}} \right] \text{ Efecto I}$$

$$T_{max,II} = \frac{M_{T2}}{2 \cdot A_{B,Efecto,II}} - \left[ \frac{W_2}{D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot I_{2,Efec,II}} \right] \text{ Efecto II}$$

$$T_{max,III} = \frac{M_{T3}}{2 \cdot A_{B,Efecto,III}} - \left[ \frac{W_3}{D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot I_{2,Efec,III}} \right] \text{ Efecto III}$$

#### Área requerida en pernos de anclaje

$$B_{A,I} = \frac{T_{max,I} \cdot [D_{Coraza,Efecto,I} + 2 \cdot t_{s1} + 2 \cdot I_{2,Efec,I}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B7} \cdot N_{Per,I}} \text{ Efecto I}$$

$$B_{A,II} = \frac{T_{max,II} \cdot [D_{Coraza,Efecto,II} + 2 \cdot t_{s2} + 2 \cdot I_{2,Efec,II}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B7} \cdot N_{Per,II}} \text{ Efecto II}$$

$$B_{A,III} = \frac{T_{max,III} \cdot [D_{Coraza,Efecto,III} + 2 \cdot t_{s3} + 2 \cdot I_{2,Efec,III}]}{3 \cdot S_{ASTM193.B7} \cdot N_{Per,III}} \text{ Efecto III}$$

#### Tensión Máxima Sobre Anillo Base

$$D_{C,Pernos,I} = D_{Coraza,Efecto,I} + t_{s1} + t_{s1} + I_{2,Efec,I} + I_{2,Efec,I} \text{ Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto I}$$

$$D_{C,Pernos,II} = D_{Coraza,Efecto,II} + t_{s2} + t_{s2} + I_{2,Efec,II} + I_{2,Efec,II} \text{ Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto II}$$

$$D_{C.Pernos.III} = D_{Coraza,Efecto,III} + t_{s3} + t_{s3} + l_{2,Efec,III} + l_{2,Efec,III} \quad \text{Diametro de circunferencia de pernos de anclaje - Efecto III}$$

$$T_{max.A.Base.I} = \frac{M_{T1} - W_1 \cdot Z \cdot D_{C.Pernos.I}}{j \cdot D_{C.Pernos.I}} \quad \text{Efecto I}$$

$$T_{max.A.Base.II} = \frac{M_{T2} - W_2 \cdot Z \cdot D_{C.Pernos.II}}{j \cdot D_{C.Pernos.II}} \quad \text{Efecto II}$$

$$T_{max.A.Base.III} = \frac{M_{T3} - W_3 \cdot Z \cdot D_{C.Pernos.III}}{j \cdot D_{C.Pernos.III}} \quad \text{Efecto III}$$

#### Fuerza Maxima de Compresión Sobre Anillo Base

$$F_{Comp.max.I} = T_{max.A.Base.I} + W_1 \quad \text{Efecto I}$$

$$F_{Comp.max.II} = T_{max.A.Base.II} + W_2 \quad \text{Efecto II}$$

$$F_{Comp.max.III} = T_{max.A.Base.III} + W_3 \quad \text{Efecto III}$$

#### Ancho de Anillo Base

$$l_{4,Efec.I} = t_{s1} + l_{2,Efec,I} + l_{3,Efec,I} + t_{pestaña} - 0,005 \quad \text{Efecto I}$$

$$l_{4,Efec.II} = t_{s2} + l_{2,Efec,II} + l_{3,Efec,II} + t_{pestaña} - 0,005 \quad \text{Efecto II}$$

$$l_{4,Efec.III} = t_{s3} + l_{2,Efec,III} + l_{3,Efec,III} + t_{pestaña} - 0,005 \quad \text{Efecto III}$$

#### Esfuerzo de Compresión del Anillo Base Sobre el Concreto

$$S_{Comp.Efec.I} = \frac{F_{Comp.max.I}}{[l_{4,Efec.I} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{C.Pernos.I}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto I}$$

$$S_{Comp.Efec.II} = \frac{F_{Comp.max.II}}{[l_{4,Efec.II} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{C.Pernos.II}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto II}$$

$$S_{Comp.Efec.III} = \frac{F_{Comp.max.III}}{[l_{4,Efec.III} + n \cdot 0,005] \cdot \frac{D_{C.Pernos.III}}{2} \cdot C_c} \quad \text{Efecto III}$$

#### Esfuerzo Maximo de Compresión en el extremo del Anillo Base Sobre el Concreto

$$S_{Max.Comp.Efec.I} = S_{Comp.Efec.I} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.I} + l_{4,Efec.I} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.I}} \right] \quad \text{Efecto I}$$

$$S_{Max.Comp.Efec.II} = S_{Comp.Efec.II} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.II} + l_{4,Efec.II} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.II}} \right] \quad \text{Efecto II}$$

$$S_{Max.Comp.Efec.III} = S_{Comp.Efec.III} \cdot \left[ \frac{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.III} + l_{4,Efec.III} + 0,005}{2 \cdot k \cdot D_{C.Pernos.III}} \right] \quad \text{Efecto III}$$

#### Espesor de Anillo Base

$$t_{A.Base.Efec.I} = [l_{2,Efec,I} + l_{3,Efec,I}] \cdot \left[ \frac{S_{Max.Comp.Efec.I}}{S_{AlSi304}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto I}$$

$$t_{A.Base.Efec.II} = [l_{2,Efec,II} + l_{3,Efec,II}] \cdot \left[ \frac{S_{Max.Comp.Efec.II}}{S_{AlSi304}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto II}$$

$$t_{A.Base.Efec.III} = [l_{2,Efec,III} + l_{3,Efec,III}] \cdot \left[ \frac{S_{Max.Comp.Efec.III}}{S_{AlSi304}} \right]^{[1 / 2]} \quad \text{Efecto III}$$