



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

INGENIERIA CONCEPTUAL DE SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS DE 9000 KVAPOR/HORA, PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

Trabajo de titulo para optar al grado de Ingeniero en Gestión Industrial

Alumno: Angelo Valentín Bono Troncoso

Profesor guía: Cristian Pávez Barrios

Asignatura: Proyecto de titulo

Paralelo: 304

Carrera: Ingeniería en Gestión Industrial

Universidad: Universidad Técnica Federico Santa María



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: INGENIERIA CONCEPTUAL DE SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS DE 9000 KVAPOR/HORA, PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

Nombre del candidato(a): Angelo Valentín Bono Troncoso

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Gestión Industrial

Campus: San Joaquín

Departamento: Departamento de Electrotecnia e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Pavez Barrios, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09/03/2026

Firma:

Cristian Pavez B.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09/03/2026

Firma:

Angelo Bono

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

CONTENIDO

1.-	Introducción	5
2.-	Capítulo 1: diagnóstico y metodología de evaluación.	7
2.1.-	Diagnostico.....	7
2.1.1.-	Antecedentes generales y especificaciones del proyecto	7
2.1.2.-	Objetivos del proyecto	7
2.1.3.-	Antecedentes cualitativos.....	8
2.1.4.-	Contexto del desarrollo del proyecto	11
2.1.5.-	Tamaño del proyecto	13
2.1.6.-	Impactos relacionados con el proyecto	14
2.2.-	Metodología	15
2.2.1.-	Supuestos para el calculo.....	15
2.2.2.-	Definición de situación base sin proyecto.....	16
2.2.3.-	Definición de situación con proyecto.....	17
2.2.4.-	Filosofía de control	18
2.2.5.-	Método para medición de beneficios y costos	18
2.2.6.-	Indicadores técnicos de comparación.....	18
3.-	Capítulo 2: Análisis técnico – comercial.....	19
3.1.-	Descripción del proceso propuesto	19
3.2.-	Layout.....	20
3.3.-	Selección de equipos	21
3.4.-	Proyectos complementarios.....	21
3.5.-	Diagrama de flujo	22
3.6.-	Consumos de energía.....	23
4.-	Evaluación económica	23
4.1.-	CAPEX del proyecto.....	25
4.1.1.-	Determinación de insumos	25
4.1.2.-	Inversiones de equipos y edificaciones.....	26
4.2.-	OPEX del proyecto.....	27
4.3.-	Payback del proyecto	28
4.4.-	Cálculos de inversión y retorno	29
4.5.-	KPI a medir	30
4.5.1.-	Situación actual estándar KPI.....	30

4.5.2.-	Situación mejorada en los KPI	32
4.5.3.-	Enfoque de los KPI	33
4.6.-	Sensibilización	34
4.6.1.-	Caso de baja temperatura de condensado	35
4.6.2.-	Cálculos de inversión y retorno para temperatura de 43°C de condensado ..	36
4.6.3.-	Caso en bajo caudal de condensado	37
4.6.4.-	cálculos de inversión y retorno para caudal de 2300 kg/h de condensado....	38
5.-	Conclusiones.....	40
6.-	Bibliografía.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 COMPARACIÓN DE PRECIOS DE LAS FUENTES DE ENERGÍA POR ENAP	11
TABLA 2 AHORROS POTENCIALES SEGÚN COSTOS DE INVERSIÓN Y PERÍODOS DE PAGO	14
TABLA 3 SUPUESTOS PARA EL CÁLCULO	15
TABLA 4 INDICADORES DE LOS SUPUESTOS	18
TABLA 5: LISTA DE EQUIPOS REQUERIDOS	21
TABLA 6: INSUMOS	25
TABLA 7: INVERSIONES DE EQUIPOS	26
TABLA 8: COSTOS DE INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA	26
TABLA 9 CÁLCULO DE PAYBACK	29
TABLA 10 TABLA DE RETORNO DE INVERSIÓN	36
TABLA 11 TABLA DE RETORNO DE INVERSIÓN	38

ÍNDICE DE GRAFICOS

GRÁFICO 1 DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA POR INDUSTRIA INDICADO POR LA CGE	8
GRÁFICO 2 DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DECLARADO POR LA CGE	9
GRÁFICO 3 COMPARACIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA DENTRO DEL SECTOR	10
GRÁFICO 4 PAYBACK	29
GRÁFICO 5 RETORNO DE INVERSIÓN	36
GRÁFICO 6 RETORNO DE INVERSIÓN	38

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: PFD DEL SISTEMA A IMPLEMENTAR	20
ILUSTRACIÓN 2 DIAGRAMA DE FLUJO	22
ILUSTRACIÓN 3 KPI DE USO ESTÁNDAR.....	31
ILUSTRACIÓN 4 KPI CON SITUACIÓN MEJORADA.....	32

1.- Introducción

En la industria alimenticia el uso de vapor constituye un proceso fundamental en la elaboración de y preparación de productos, dado que usa en la cocción, pasteurización, limpieza y acondicionamiento de los mismos. Una caldera que produce 9.000 kilogramo Vapor por Hora (kvapor/hora), tiene un consumo considerable para lo que la operación de la planta.

En el contexto actual del país, en el que la competitividad es mayor y las normas medio ambientales son más exigentes, es imperativo implementar medidas que mejoren la eficiencia térmica de las instalaciones industriales. La reducción del consumo en combustibles fósiles no solo contribuye a disminuir costos operacionales, sino que también se traduce en una baja en las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO_2), con esto pudiendo cumplir las nuevas metas de sostenibilidad que exigen normativas tanto nacionales como internacionales.

Dentro de las estrategias de eficiencia energética a calderas, el aprovechamiento del retorno del condensado ha demostrado ser altamente efectivo. El vapor utilizado en procesos industriales se condensa al ceder su calor, que termina retornando al sistema. Reutilizar este líquido a alta temperatura para precalentar agua de alimentación de la caldera permite reducir significativamente la energía requerida para la conversión de vapor, mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de los equipos por el choque térmico.

El presente proyecto tiene como finalidad desarrollar la ingeniería conceptual de un sistema de precalentamiento de aguas de alimentación, basado en el uso del retorno de condensados, para una caldera de 9.000 kg vapor/hora en la industria alimenticia. La propuesta busca caracterizar las condiciones actuales de operación, analizar el potencial de recuperación de calor, dimensionar conceptualmente los equipos necesarios y establecer un marco técnico y normativo que permita evaluar la factibilidad de su implementación.

La investigación se estructurará en cuatro capítulos principales: un diagnóstico inicial y definición de la metodología de evaluación, un análisis de prefactibilidad de mercado orientado al contexto energético y normativo, un análisis de prefactibilidad técnica enfocado en el diseño conceptual del sistema de precalentamiento y, finalmente, justificación económica.

Con este enfoque, el estudio pretende aportar a la mejora de la eficiencia energética en la industria alimenticia nacional, disminuyendo los costos operacionales y la

huella ambiental, a la vez que se generan lineamientos de ingeniería aplicados a proyectos de recuperación de energía en calderas industriales.

2.- Capítulo 1: diagnóstico y metodología de evaluación.

2.1.- Diagnostico

2.1.1.- Antecedentes generales y especificaciones del proyecto

La industria alimenticia es uno de los sectores con mayor consumo en el escenario chilena, debió a la complejidad de los sistemas de procesamiento que se pueden llevar a cabo, cocción, pasteurización y almacenamiento, en cada uno de ellos el alimento debe ser llevado a ciertas temperaturas y luego mantener temperaturas en el ambiente.

Existen varias maneras de llevar a cabo un ahorro energético, para este proyecto se va a abordar la ingeniería conceptual de un sistema de precalentamiento de aguas usando el retorno de condensado, considerando calderas de 9000 kg vapor/hora, con esto se pretende llevar a cabo mostrar el ahorro de esta implementación.

2.1.2.- Objetivos del proyecto

Objetivo General:

Desarrollar la ingeniería conceptual de lo que es el análisis para el uso de del retorno de condensado para precalentar el agua de uso de caldera.

Objetivos específicos:

- Análisis de la situación de un sistema de calentamiento de aguas usando calderas de 9.000 kg vapor/hora
- Identificar lo que es el condensado y de donde proviene, para saber si puede ser reutilizado.
- Selección de equipos, conceptuales.
- Evaluación de beneficios económicos, ambientales y operacionales.

2.1.3.- Antecedentes cualitativos

El análisis del consumo energético por industria permite dimensionar, en términos generales, el uso de la energía a nivel país. A través de esta evaluación es posible identificar los sectores productivos que presentan una mayor demanda energética y comprender su influencia en el consumo energético nacional. Este tipo de análisis constituye una base relevante para la planificación energética, la formulación de políticas públicas y la implementación de medidas orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de la energía.

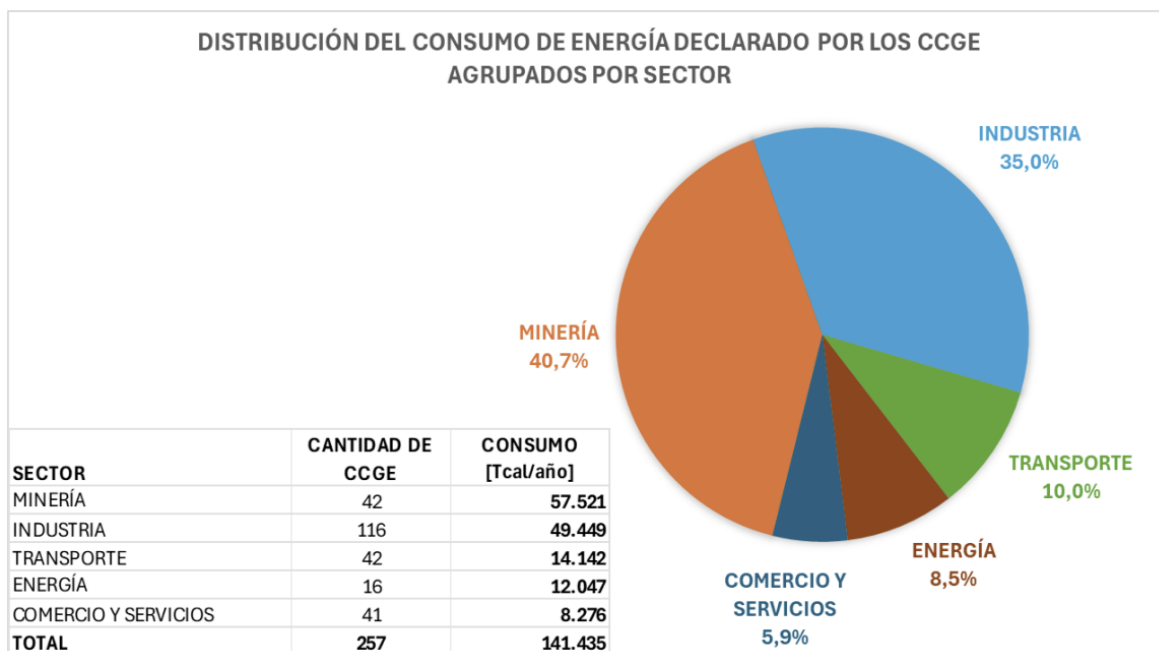


Gráfico 1 Distribución de energía por industria indicado por la CGE

En el siguiente gráfico se observa la distribución de las fuentes de energía utilizadas en Chile para el año 2020. Esta distribución refleja un escenario impulsado fuertemente por políticas promovidas por el Estado, orientadas a la implementación de medidas medioambientales más exigentes, con el objetivo de modificar progresivamente el uso de materias primas y fomentar una matriz energética más sostenible.

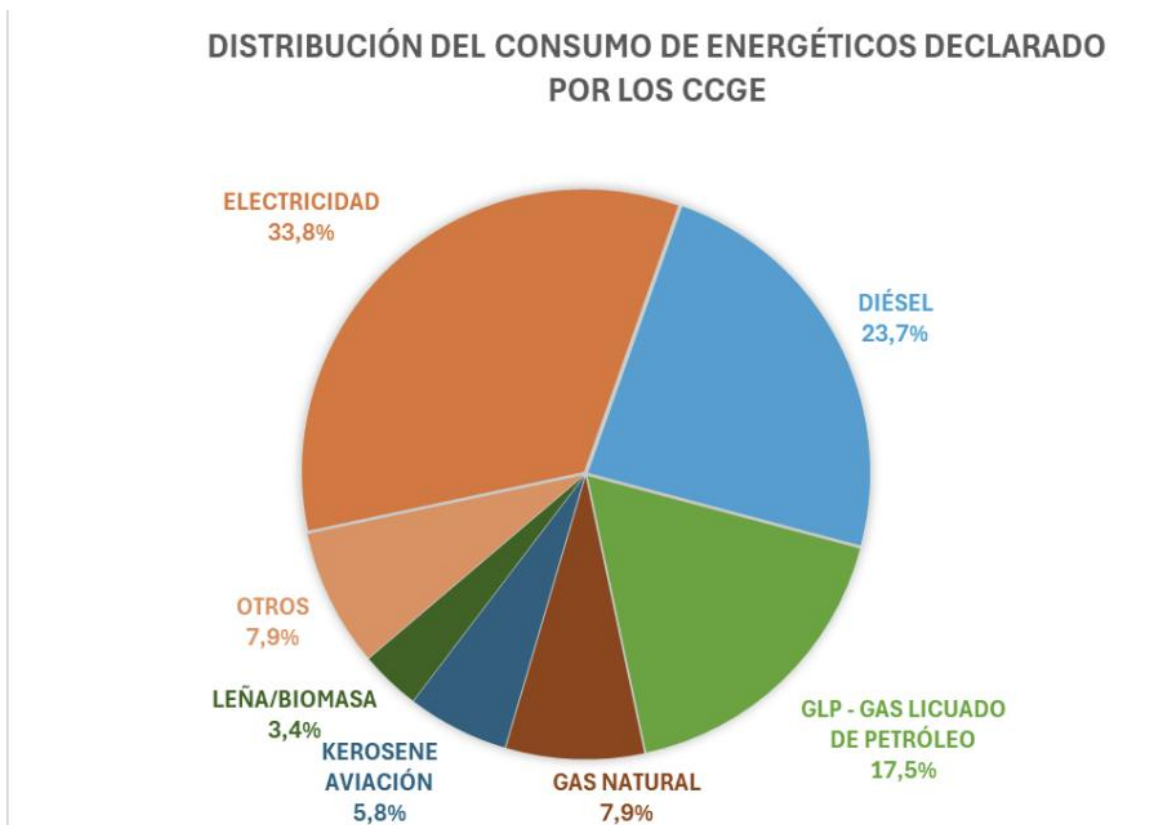


Gráfico 2 distribución de energía declarado por la CGE

Con lo anterior, se presenta el consumo de energía térmica por tipo de industria alimenticia, evidenciando un elevado nivel de consumo en cada una de ellas asociado a sus procesos productivos. Dicho consumo se destina principalmente a la generación de vapor, el cual es utilizado de forma transversal en las distintas etapas de producción de los alimentos.

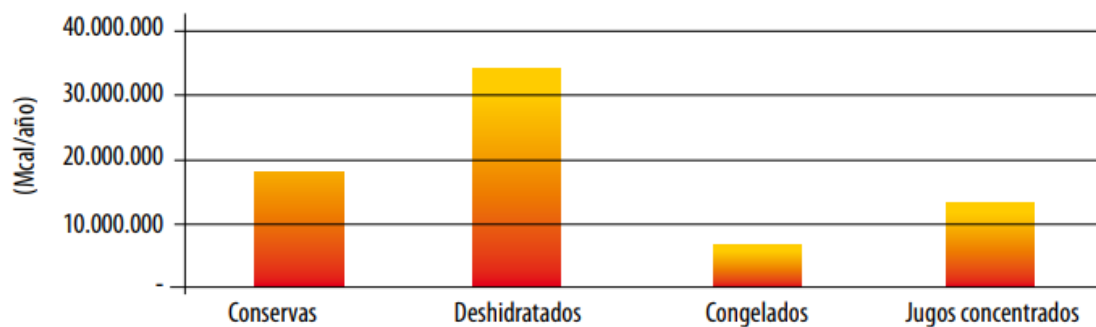


Gráfico 3 Comparación de consumos de energía dentro del sector

2.1.4.- Contexto del desarrollo del proyecto

Actualmente las energías en Chile tienen un costo sostenido al alza, si bien en el ultimo año se estabilizo, muchas industrias deben actualizar sus sistemas productivos en generación de energía, según lo que indica ENAP, las materias primas para la generación tuvieron un alza desde el año 2020 hasta la fecha.

Fecha	Gasolina 93 (US\$/m3)	Gasolina 97(US\$/m3)	Kerosene (US\$/m3)	Diesel (US\$/m3)	GLP(US\$/ton)	Fuel oil N°6 (US\$/tm)
2020/01/02	\$485	\$499	\$655	\$525	\$415	\$390
2021/01/07	\$512	\$529	\$714	\$581	\$440	\$412
2022/01/06	\$622	\$639	\$912	\$745	\$528	\$472
2023/01/05	\$755	\$773	\$1180	\$957	\$612	\$535
2024/01/04	\$698	\$716	\$1033	\$844	\$548	\$497
2025/01/02	\$642	\$668	\$820	\$662	\$519	\$481
2025/09/25	\$628	\$659	\$802	\$655	\$519	\$477
2025/10/02	\$622	\$657	\$805	\$663	\$518	\$482

Tabla 1 comparación de precios de las fuentes de energía por ENAP

Según lo observado, se registra un aumento del 26 % en los costos asociados a la energía, lo que indica un encarecimiento significativo de este insumo. En contraste, de acuerdo con los datos del Ministerio de Hacienda, la canasta básica presentó un incremento de solo un 13,7 % en el mismo período. Esta diferencia evidencia una presión sobre los márgenes de la industria, la cual ha debido absorber parte del aumento de los costos energéticos con el fin de mantener su competitividad y participación en el mercado.

Se vuelve imperativo tener que reducir coste con proyectos que posean un retorno de corto plazo para las industrias.

También se debe considerar que aproximadamente dependiendo de que alimentos produce el 70% es energía térmica, es decir vapor de caldera, ya que todos los procesos cuentan con los subprocesos de cocción, pasteurización, en general, esto según los datos de la asociación de Empresas de Alimentos de Chile.

También se debe considerar, que según Engineering, el retorno de condensado ideal para la industria alimenticia es del 90%, esto puede variar dependiendo de los procesos y la industria, además según el mismo artículo el condensado posee un mínimo del 16% de energía del vapor, original, sin considerar si es vapor saturado, sobre calentado, para líneas alimenticias hablaremos de vapor saturado en todo momento.

En general, toda industria tiene retorno de condensado, que utilizara para volver a introducir a la caldera, para así poder volver a ser convertida en vapor, pero reutilizar la energía latente del condensado es fundamental para obtener una optimización del proceso.

2.1.5.- Tamaño del proyecto

El proyecto solo considera calderas de 9.000 kg vapor/hora, esto porque es un la más estándar hecha por fabricantes como Bosch, Alfa Laval, Pirobloc, en general son calderas del tipo piro tubular, pero para efectos del proyecto esto no es de mayor relevancia, ya que el impacto en cuanto ahorro si es que son piro tubulares o acuotubulares no es de gran impacto, en este caso se considera el estándar.

Además, el retorno de condensado se tomará en 85°C y la temperatura del agua se considerará en temperatura ambiente, 20°C, estos son datos estándar de proceso, para el dimensionamiento de los equipos.

El proyecto solo considera lo que es la ingeniería conceptual:

- Alcance.
- Viabilidad técnica y económica
- Objetivos generales.
- Bases y diseño
- Identificación de equipos
- Costo de inversión aproximado y mantenimiento.

2.1.6.- Impactos relacionados con el proyecto

Se busca con este proyecto un ahorro de un 15% a un 30% de ahorro potencial, depende en gran medida de la capacidad de retorno de condensado de la planta, pero este un rango optimo de la implementación.

Ahorro Potencial	Costos de inversión y periodos
5 a 15%	Sin costo de inversión, sólo mejorando la mantención Ejemplo: Eliminar o reducir las fugas de agua, vapor y aire comprimido, interruptores, iluminación, cambiar los set-up de operación de algunos equipos, motores de alta eficiencia, recuperación de condensado de calderas.
15 a 30%	Con bajo costo de inversión y períodos de pagos menores a 5 años Ejemplo: Aislación de cañerías. Reducción de factor de potencia, recuperación de purgas de caldera, economizador en calderas, eficiencia de calderas y cocedores, evaporadores, etc.
30 a 50%	Con costos de inversión mayores y períodos de retorno superior a 5 años Ejemplo: Aislación en calderas, cocedores, evaporadores, generación de biogás a partir de purgas de biomasa, sistemas de cogeneración a partir de biomasa o para satisfacer las cargas térmicas de calor o enfriamiento, etc.

Tabla 2 Ahorros potenciales según costos de inversión y períodos de pago

2.2.- Metodología

2.2.1.- Supuestos para el calculo

En la siguiente tabla se mostraran los valores deseados para la evaluación del de esta ingeniería conceptual, estos valores son teóricos para condiciones ideales de operación, en el capítulo de evaluación económica se realizara un supuesto para en casos mas desfavorables.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Producción de vapor de caldera	m_v	9.000	kg/h
Temperatura agua (lado frío)	$T_{in} - T_{out}$	20 → 55	°C
Temperatura condensado (lado caliente)	$T_{in} - T_{out}$	90 → 60	°C
Caudal de condensado	$m_{condensado}$	7.000	kg/h
Presión de condensado (típica)	----	4	bar(g)
Calor específico (agua/cond.)	C_p	4,18	kJ/kg.°C
Densidad del agua	ρ	1.000	kg/m ³
Eficiencia térmica caldera	η	0,85	—
PCI GLP	PCI	46.000	kJ/kg
Horas de operación	H	6.000	h/año

Tabla 3 Supuestos para el cálculo

2.2.2.- Definición de situación base sin proyecto

En la situación base de cualquier planta de alimentos el agua que ingresa a la caldera esta a temperatura ambiente (20°C a 25°C), lo que obliga a inyectar mas GLP para poder llegar a las temperaturas ideales de 180°C a 7 bar, con esto en mente como un consumo general de vapor para una caldera de 9.000 kg vapor/hora

Considerando subir la temperatura de 20°C a 45°C, con un retorno de condensado de 7.000 kg/h

- **Energía requerida para el preparar vapor**

$$Q_{req} = m * C_p * (T_v - T_{in})$$

$$Q_{req} = 9.000 * 4,18 * (180 - 20)$$

$$Q_{req} = 6.019.200 \text{ kJ/h}$$

- **Energía entregada por el combustible**

$$Q_{combustible} = \frac{Q_{req}}{n}$$

$$Q_{combustible} = \frac{6.019.200}{0,85}$$

$$Q_{combustible} = 7.081.412 \text{ kJ/h}$$

- **Consumo de GLP**

$$m_{combustible} = \frac{Q_{combustible}}{PCI}$$

$$m_{combustible} = \frac{7.081.412}{46.000}$$

$$m_{combustible} = 154 \text{ kg/h}$$

- **Consumo anual y costo**

$$m_{combustible \text{ anual}} = 154 * 6.000 = 924.000 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo GLP anual} = 924.000 * 518 = 478.632.000 \text{ CLP /año}$$

2.2.3.- Definición de situación con proyecto

En la definición del proyecto, se considera que el caudal de condensado sea constante, de 7.000 kg/h de retorno considerando un retorno 77% del retorno, con una temperatura de 90°C

Para el agua, se considera 20°C, con una regulación de temperatura con una válvula de control y con ello reducir su caudal en base a la temperatura.

Se considera un intercambiador de placas para el intercambio térmico entre los 2 fluidos.

- Balance energético

$$m_{condensado} * Cp * (90 - 60) = m_{agua} * Cp * (55 - 20)$$

$$m_{agua} = 7.000 * \frac{30}{35} = 6.000 \frac{kg}{h} \Rightarrow 6 m^3/h$$

- Energía recuperada

$$Q = m_{agua} * Cp * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 6.000 * 4,18 * 35 = 877.800 kJ/h$$

- Ahorro equivalente en GLP

$$m_{GLP} = \frac{Q}{n * PCI}$$

$$m_{GLP} = \frac{877.800}{0,85 * 46.000} = 22,45 \frac{kg}{h}$$

$$Ahorro anual = 22,45 * 6.000 = 135 t/año$$

$$Consumo proyectado = 154 - 22,45 = 131,6 \frac{kg}{h}$$

$$Total en pesos = 131,6 * 6.000 * 518 = 409.012.800 CLP/anual$$

2.2.4.- Filosofía de control

- **Condensado:** Se espera recuperar parte del condensado, sabiendo que no todo el condensado es útil para la caldera, se planea usar solo el 77%, de manera fija.
- **Alimentación del agua:** Se regula caudal para un intercambio más efectivo, con el finde obtener mayor temperatura.
- **Sistemas de pipping:** Se debe considerar en el sistema, trampas, filtros, elementos primarios para la medición de temperatura.

2.2.5.- Método para medición de beneficios y costos

Para el método de evaluación económica se usarán medidas para mejoras de procesos, al ser un proceso que no esta involucrado en lo que es la producción no hay paradas no programadas o tales, además es una manera de ahorra energía.

Por tanto, se usará el sistema de **CAPEX, OPEX y PAYBACK**, esta decisión de no usar flujo de caja, es dado que es una ingeniería conceptual para un proceso y solo se debe demostrar la conveniencia técnica-económica, a partir de una estimación directa de determinación de periodo de recuperación

2.2.6.- Indicadores técnicos de comparación

Concepto	Sin Proyecto	Con Proyecto	Diferencias
Caudal condensado por hora (kh/h)		7000	
Presión de condensado (bar)		4	
Temperatura de agua de alimentación (°C)	20	55	35
Temperatura de salida del condensado (°C)	90	60	30
Caudal del agua para intercambiador (m3/h)		6	
Bypass de agua (m3/h)		3	
Energía recuperada (kJ/h)		877800	+877800
Ahorro GLP (kg)		22,45	-22,45
Ahorro GLP (t/año)		135	-135
Consumo GLP al año (t/año)	154	131,6	22,4

Tabla 4 Indicadores de los supuestos

3.- Capítulo 2: Análisis técnico – comercial

3.1.- Descripción del proceso propuesto

El proceso consiste en implementar un sistema de recuperación de calor para precalentar el agua de alimentación de caldera. Utilizar el retorno de condensado como fuente térmica, con el fin de aprovecharse antes de ser desechado.

El sistema se basa en el uso de un intercambiador de calor de placas, con sistemas de retroalimentación de temperatura y control, como lo son elementos sensores de temperaturas, controladores de temperaturas y válvulas de control.

El objetivo es realizar la ingeniería conceptual, estimar la reducción de consumo de GLP de la caldera.

3.2.- Layout

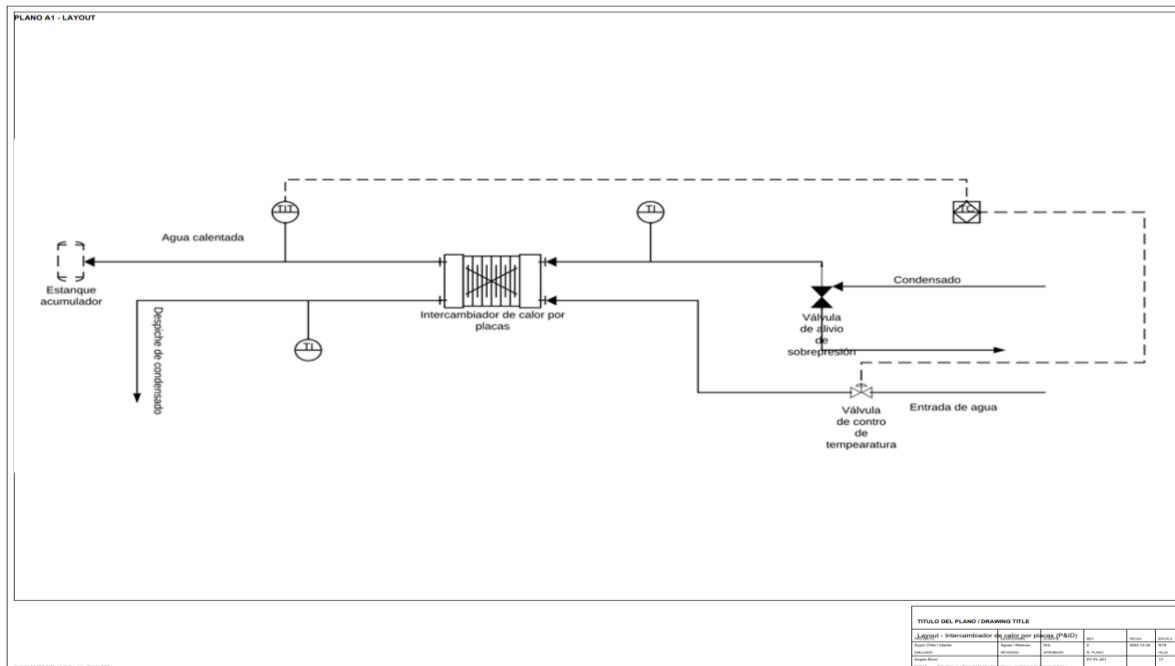


Ilustración 1: PFD del sistema a implementar

- El condensado de retorno a 90 °C llega al intercambiador.
- El agua fría de alimentación (20 °C) ingresa controlada por una válvula.
- Se transfiere calor en el intercambiador, elevando la temperatura del agua a 60 °C.
- El condensado se enfría a 60 °C y se despicha.
- El agua precalentada se mezcla con el bypass hacia la caldera, alcanzando el caudal total de 9 m³/h.

3.3.- Selección de equipos

Equipo	Tipo	Material	Función	Observaciones
Intercambiador de placa	Placas	316L	Transferencia térmica entre condensado y agua	Alta eficiencia ($\eta > 90\%$)
Válvula de control	Globo neumática	Acero inoxidable	Regular caudal de agua	control proporcional 4-20 mA
Controlador de temperatura	Digital con PID	-----	Mantener la temperatura del agua a 60°	Entrada de señal del transmisor de temperatura
Tuberías	Schedule 40	Aisi 304	Transporte de fluidos	Aislamiento térmico requerido
Transmisores de temperatura	PT100	316L	Indicar y transmitir la temperatura	debe venir con señal eléctrica para el controlador.

Tabla 5: Lista de equipos requeridos

3.4.- Proyectos complementarios

- Implementación de aislamiento térmico en líneas calientes.
- Integración al sistema de control existente (PLC de caldera).
- Reubicación de líneas y soporte metálico tipo skid.
- Medición de caudales y temperaturas para monitoreo energético.

3.5.- Diagrama de flujo

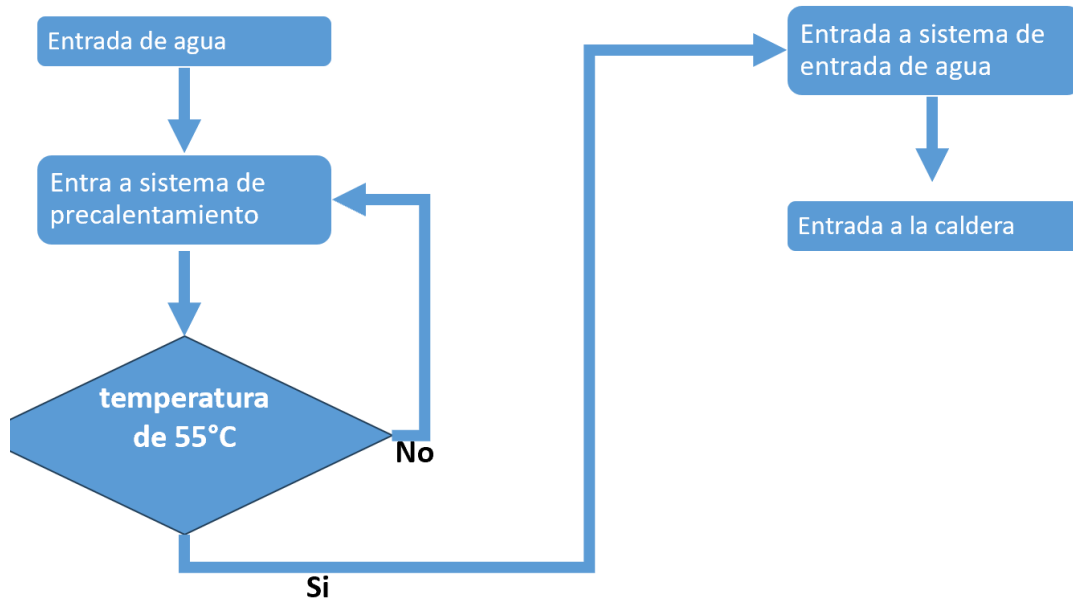


Ilustración 2 Diagrama de flujo

3.6.- Consumos de energía

- Balance energético

$$m_{condensado} * Cp * (90 - 60) = m_{agua} * Cp * (55 - 20)$$

$$m_{agua} = 7.000 * \frac{30}{35} = 6.000 \frac{kg}{h} \Rightarrow 6 m^3/h$$

- Energía recuperada

$$Q = m_{agua} * Cp * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 6.000 * 4,18 * 35 = 877.800 \text{ kJ/h}$$

- Ahorro equivalente en GLP

$$m_{GLP} = \frac{Q}{n * PCI}$$

$$m_{GLP} = \frac{877.800}{0,85 * 46.000} = 22,45 \frac{kg}{h}$$

$$Ahorro \text{ anual} = 22,45 * 6.000 = 135 \text{ t/año}$$

4.- Evaluación económica

Para este proyecto se desarrollará un análisis basado en el CAPEX, OPEX y Payback, con el propósito de evaluar su factibilidad comercial. En una ingeniería conceptual, la primera etapa consiste en determinar si el proyecto es técnicamente realizable y, posteriormente, si resulta viable de implementar. Por ello, es fundamental comprender estos conceptos antes de avanzar en la evaluación.

El CAPEX corresponde al gasto inicial de capital requerido para poner en marcha el proyecto y habilitar su funcionamiento. Este concepto incluye todos los costos

asociados a la adquisición de los equipos principales, las instalaciones mecánicas, la integración con el sistema existente y la provisión de recursos destinados a cubrir eventuales contingencias propias del proceso de implementación. En conjunto, este valor constituye la base económica desde la cual se analiza la conveniencia del proyecto.

El OPEX, por su parte, agrupa los costos operativos que se generan durante la vida útil del sistema. Debido a que la propuesta utiliza energía residual presente en el condensado, los costos de operación son reducidos y se concentran principalmente en actividades de mantenimiento preventiva, necesarias para asegurar la continuidad operativa del intercambiador de calor y de los elementos de control asociados.

Finalmente, el Payback es un indicador que permite determinar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los ahorros generados por el proyecto. En este caso, dichos ahorros provienen directamente de la disminución del consumo de GLP requerido para elevar la temperatura del agua de alimentación de la caldera. El Payback resulta especialmente adecuado para estudios de ingeniería conceptual, ya que entrega una evaluación directa y comprensible del desempeño económico del proyecto.

4.1.- CAPEX del proyecto

El proyecto presenta un CAPEX total estimado de 57.250.000 CLP, valor que refleja la inversión necesaria para instalar el sistema de precalentamiento. Este monto incluye el costo del intercambiador de placas, las válvulas de control de temperatura, la instrumentación asociada al monitoreo térmico, las modificaciones en las líneas de proceso, la fabricación de soportes, la instalación mecánica y la puesta en marcha del sistema. Además, se incorporan costos indirectos como capital de trabajo e imprevistos, los cuales son indispensables para absorber variaciones propias de proyectos térmicos en etapa conceptual.

Para efectos comparativos, el valor del CAPEX se expresa también en unidades de fomento, lo que permite analizar el proyecto utilizando una unidad monetaria más estable frente al escenario inflacionario. Considerando un valor de 39.000 CLP por UF, el CAPEX corresponde a 1.468 UF, cifra que se toma como referencia para evaluar el periodo de retorno.

4.1.1.- Determinación de insumos

Tipo	Descripción	Unidad	Valor
Insumo	GLP base (sin recuperación)	kg/h	154
Insumo reducido	GLP con recuperación	kg/h	131,6
Producto	Agua precalentada	°C	55
Subproducto	Condensado enfriado	°C	60

Tabla 6: Insumos

4.1.2.- Inversiones de equipos y edificaciones

Concepto	Valor aproximado (UF)
Intercambiador de calor	\$ 633
Válvula de control	\$ 127
Controlador de temperatura	\$ 25
Instrumentación y tuberías	\$ 127
Ingeniería y control	\$ 127
Montaje y obras civiles	\$ 101
Total de la inversión	\$ 1.139

Tabla 7: Inversiones de equipos

Para la inversión de capital de trabajo se considera con un aproximado del 5% del que sería los activos iniciales del proyecto

$$5\% * 45.000.000 = 2.250.000$$

Concepto	Descripción	Costo aproximado (UF)
Instalación mecánica	Montaje e instalación térmica	\$ 101
Puesta en marcha	Pruebas y calibración	\$ 25
Capacitación	Jornada técnica	\$ 13
Total		\$ 139

Tabla 8: Costos de instalación y puesta en marcha

Los costos de imprevistos se calculan en base al 10% de seguridad para el proyecto de los activos iniciales.

$$10\% * 45.000.000 = 4.500.000$$

Total, del proyecto, se calcula en un aproximado de, 1.139 UF para el inicio del proyecto.

4.2.- OPEX del proyecto

El costo operacional del sistema de precalentamiento es significativamente menor que el de otras tecnologías debido a que el proyecto utiliza energía contenida en el retorno de condensado sin requerir un suministro energético adicional. El único costo operacional relevante es el asociado a la mantención semestral del sistema, cuyo objetivo es asegurar la eficiencia térmica del intercambiador de placas y el correcto funcionamiento de la instrumentación y válvulas de control.

El costo estimado para cada mantención es de 3.000.000 CLP por periodo, equivalente a 76,92 UF. De esta manera, el OPEX semestral representa un gasto operativo fácilmente previsible y estable en el tiempo, lo que facilita la estimación del flujo neto utilizado para el cálculo del Payback.

4.3.- Payback del proyecto

El análisis del Payback se desarrolla considerando cinco periodos sucesivos, cada uno equivalente a un semestre de operación. El ahorro económico del proyecto proviene de una reducción anual real en el consumo de GLP equivalente a 69.619.200 CLP, cifra que, expresada en unidades de fomento, corresponde a 1.784,08 UF por año. Dividiendo este valor entre dos, se obtiene un ahorro semestral de 892,04 UF, el cual representa el beneficio bruto generado por el proyecto antes de descontar los costos de mantención.

El flujo neto de cada periodo se calcula restando al ahorro semestral el OPEX semestral de 76,92 UF, entregando como resultado un beneficio neto de 815,12 UF por periodo. Este flujo neto se va acumulando periodo tras periodo hasta alcanzar un valor igual o superior al CAPEX del proyecto. Dado que el CAPEX es de 1.468 UF, el proyecto recupera su inversión dentro del segundo periodo, lo cual equivale aproximadamente a un año de operación.

4.4.- Cálculos de inversión y retorno

Para esta evaluación se vera su retorno para saber si se debe avanzar a una ingeniería básica y luego de detalle, esto solo determinara un aproximado de lo que sería el retorno de inversión (Payback), se evaluara en 5 periodos, cada uno de un semestre.

Periodos	0	1	2	3	4	5
Ahorro por periodo (UF)		\$ 892	\$ 892	\$ 892	\$ 892	\$ 892
Mantenición OPEX (UF)		\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77
Inversión incial CAPEX (UF)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo neto del proyecto (UF)	\$ -1.139	\$ 815	\$ 815	\$ 815	\$ 815	\$ 815
Flujo acumulado (UF)	\$ -1.139	\$ -324	\$ 491	\$ 1.306	\$ 2.121	\$ 2.936
Flujo de inversiónn	\$ 1.139	\$ 1.216	\$ 1.293	\$ 1.370	\$ 1.447	\$ 1.524

Tabla 9 cálculo de payback

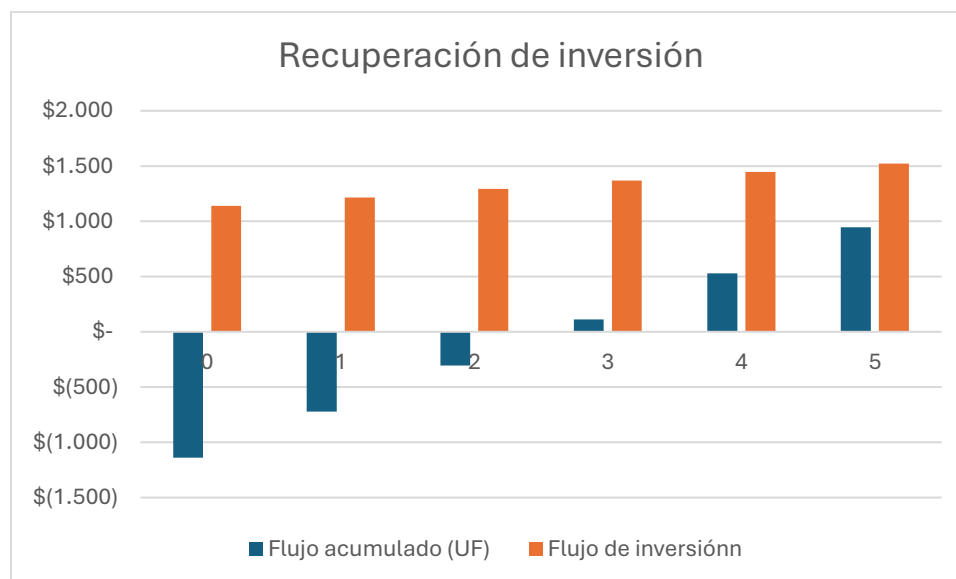


Gráfico 4 Payback

4.5.- KPI a medir

Los indicadores clave de desempeño (KPI) definidos para la evaluación de este proyecto se establecen desde el punto de vista operacional, considerando que la propuesta corresponde a una mejora de proceso y no a una modificación directa de la capacidad productiva de la planta. En este contexto, los KPI seleccionados deben ser medibles en operación, comprensibles para el personal de sala de calderas y directamente asociados a la producción de vapor y al consumo de combustible.

El principal objetivo de la evaluación es determinar cuánto ahorro de combustible puede generarse a partir del aumento de la temperatura del agua de alimentación mediante la recuperación de calor del condensado, manteniendo constante la producción de vapor de la caldera.

Para efectos de esta evaluación, se utilizan datos estándar de operación, propios de calderas industriales de 9.000 kg de vapor por hora, ampliamente aceptados en la industria alimenticia.

4.5.1.- Situación actual estándar KPI

En la situación actual, la caldera opera con agua de alimentación que ingresa a temperatura cercana a ambiente, típicamente entre 20 y 25 °C. Esta condición obliga a que el sistema de combustión consuma una mayor cantidad de GLP para elevar la temperatura del agua hasta las condiciones necesarias para la generación de vapor.

La producción de vapor se mantiene cercana a los 9.000 kg/h, sin embargo, el consumo específico de GLP es elevado, ya que una fracción significativa de la energía suministrada se destina únicamente a compensar la baja temperatura del agua de entrada. Adicionalmente, el retorno de condensado es limitado, tanto en porcentaje como en aprovechamiento energético, lo que reduce la eficiencia global del sistema.

Desde el punto de vista operacional, esta situación se traduce en:

- Mayor consumo horario de combustible.
- Menor eficiencia vapor–combustible.
- Baja temperatura del agua de alimentación.
- Menor recuperación de energía térmica disponible en el proceso.



Ilustración 3 KPI de uso estándar

4.5.2.- Situación mejorada en los KPI



Ilustración 4 KPI con situación mejorada

4.5.3.- Enfoque de los KPI

Los KPI utilizados permiten comparar ambas situaciones de forma clara y objetiva, centrándose en variables que el personal de operación puede monitorear directamente en sala de calderas, tales como:

- Producción real de vapor (kg/h).
- Consumo de GLP (kg/h).
- Consumo específico de GLP (kg GLP/kg vapor).
- Temperatura del agua de alimentación (°C).
- Porcentaje de retorno de condensado (%).
- Energía térmica recuperada (kW).

De esta manera, la evaluación operacional demuestra que la mejora propuesta permite reducir el consumo de combustible sin comprometer la producción, validando la conveniencia técnica del proyecto desde el punto de vista de operación y eficiencia energética.

4.6.- Sensibilización

Para este proyecto no influye la variable de costo de gas de manera negativa, si el precio del combustible sube, el ahorro final será mayor, este proyecto apunta a una eficiencia energética, en utilizar el condensado que no se puede reutilizar dentro de la caldera, entonces lo que se puede observar son los siguientes casos.

- El condensado que se reutilice no este a la temperatura deseada.
- No se puedan reutilizar la cantidad deseada.

Estos son los casos más desfavorables y reales para las condiciones de uso, evaluaremos bajo estos 2 supuesto de manera concreta cuando sería el retorno de inversión

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Producción de vapor de caldera	m_v	9.000	kg/h
Temperatura agua (lado frío)	$T_{in} - T_{out}$	20 → 55	°C
Temperatura condensado (lado caliente)	$T_{in} - T_{out}$	90 → 60	°C
Caudal de condensado	$m_{condensado}$	7.000	kg/h
Presión de condensado (típica)	----	4	bar(g)
Calor específico (agua/cond.)	C_p	4,18	kJ/kg.°C
Densidad del agua	ρ	1.000	kg/m ³
Eficiencia térmica caldera	η	0,85	—
PCI GLP	PCI	46.000	kJ/kg
Horas de operación	H	6.000	h/año

Para ellos calcularemos en que rangos debe estar el peor escenario en el que el retornó de inversión no se pueda dar en 5 semestres

4.6.1.- Caso de baja temperatura de condensado

Bajo el supuesto de limite en el que el retorno de inversión sea superior a los 5 semestres, se estimada que la temperatura limite es de 43°C, dado que debe tener 1/3 del retorno de inversión para no ser viable este proyecto.

- **Relación térmica simplificada**
- Temperatura del agua 20°C

$$\Delta T_{bas} = 90^{\circ}C - 20^{\circ}C = 70^{\circ}C)$$

$$\Delta T_{bas} = \frac{70^{\circ}C}{3} = 43^{\circ}C$$

- **Balance energético**

$$m_{condensado} * Cp * (43 - 60) = m_{agua} * Cp * (55 - 20)$$

$$m_{agua} = 7.000 * \frac{30}{35} = 6.000 \frac{kg}{h} \Rightarrow 6 m^3/h$$

- **Energía recuperada**

$$Q = m_{agua} * Cp * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 6000 * 4,18 * (32,4 - 20) = 311.000 kJ/h$$

- **Ahorro equivalente en GLP**

$$m_{GLP} = \frac{Q}{n * PCI}$$

$$m_{GLP} = \frac{311.000}{0,85 * 46.000} = 7,95 \frac{kg}{h}$$

$$\text{Ahorro anual} = 7,95 * 6.000 = 47,7 \text{ t/año}$$

$$\text{Consumo proyectado} = 154 - 7,95 = 146,05 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Total en pesos} = 131,6 * 6.000 * 518 = 453,6 \text{ millones CLP/anual}$$

4.6.2.- Cálculos de inversión y retorno para temperatura de 43°C de condensado

Con los costos ya tomados, se realiza la comparación de retorno de inversión, con estos nuevos cálculos

Periodos	0	1	2	3	4	5
Ahorro por periodo (UF)		\$ 317	\$ 317	\$ 317	\$ 317	\$ 317
Mantenición OPEX (UF)		\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77
Inversión inicial CAPEX (UF)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo neto del proyecto (UF)	\$ -1.139	\$ 240	\$ 240	\$ 240	\$ 240	\$ 240
Flujo acumulado (UF)	\$ -1.139	\$ -899	\$ -660	\$ -420	\$ -181	\$ 59
Flujo de inversiónn	\$ 1.139	\$ 1.216	\$ 1.293	\$ 1.370	\$ 1.447	\$ 1.524

Tabla 10 Tabla de retorno de inversión

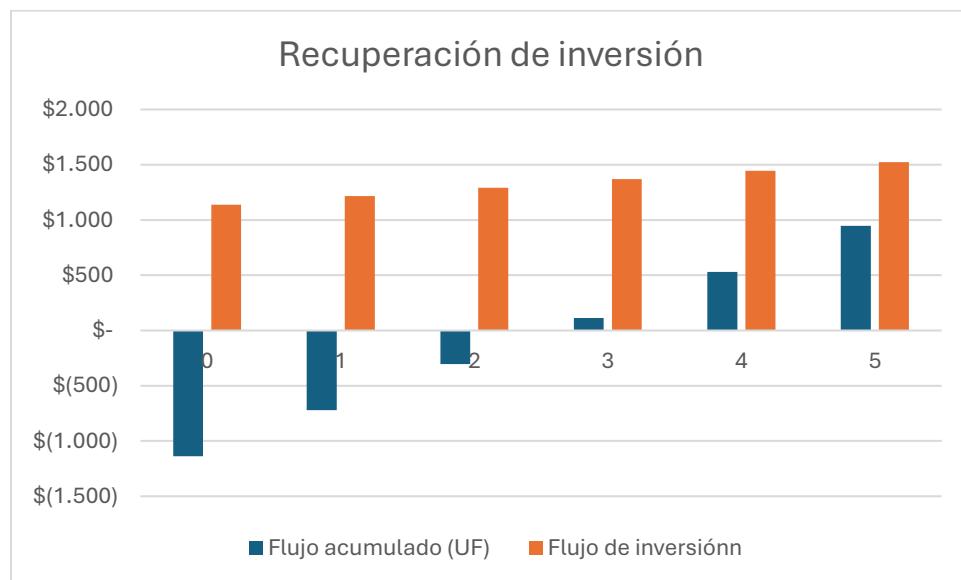


Gráfico 5 Retorno de inversión

4.6.3.- Caso en bajo caudal de condensado

Bajo el supuesto de limite en el que el retorno de inversión sea superior a los 5 semestres, se estimada que el caudal límite de condensado es de 2300 kg/h, dado que debe tener 1/3 del retorno de inversión para no ser viable este proyecto.

$$Q = \frac{7000}{3} = 2.333 \text{ kg/h}$$

- Balance energético

$$m_{\text{condensado}} * Cp * (90 - tf) = m_{\text{agua}} * Cp * (tf - 20)$$

$$2.300 * (90 - tf) = 6000 * (tf - 20)$$

$$tf = 39,4^{\circ}\text{C}$$

- Energía recuperada

$$Q = m_{\text{agua}} * Cp * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

$$Q = 6000 * 4,18 * (39,4 - 20) = 486.000 \text{ kJ/h}$$

- Ahorro equivalente en GLP

$$m_{\text{GLP}} = \frac{Q}{n * PCI}$$

$$m_{\text{GLP}} = \frac{486.000}{0,85 * 46.000} = 12,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Ahorro anual} = 12,4 * 6.000 = 74,4 \text{ t/año}$$

$$\text{Consumo proyectado} = 154 - 12,4 = 141,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Total en pesos} = 141,6 * 6.000 * 518 = 440,092 \text{ millones CLP/anual}$$

4.6.4.- cálculos de inversión y retorno para caudal de 2300 kg/h de condensado

Con los costos ya tomados, se realiza la comparación de retorno de inversión, con estos nuevos cálculos

Periodos	0	1	2	3	4	5
Ahorro por periodo (UF)		\$ 494	\$ 494	\$ 494	\$ 494	\$ 494
Mantenimiento OPEX (UF)		\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77	\$ 77
Inversión inicial CAPEX (UF)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo neto del proyecto (UF)	\$ -1.139	\$ 417	\$ 417	\$ 417	\$ 417	\$ 417
Flujo acumulado (UF)	\$ -1.139	\$ -722	\$ -305	\$ 112	\$ 529	\$ 946
Flujo de inversiónn	\$ 1.139	\$ 1.216	\$ 1.293	\$ 1.370	\$ 1.447	\$ 1.524

Tabla 11 tabla de retorno de inversión

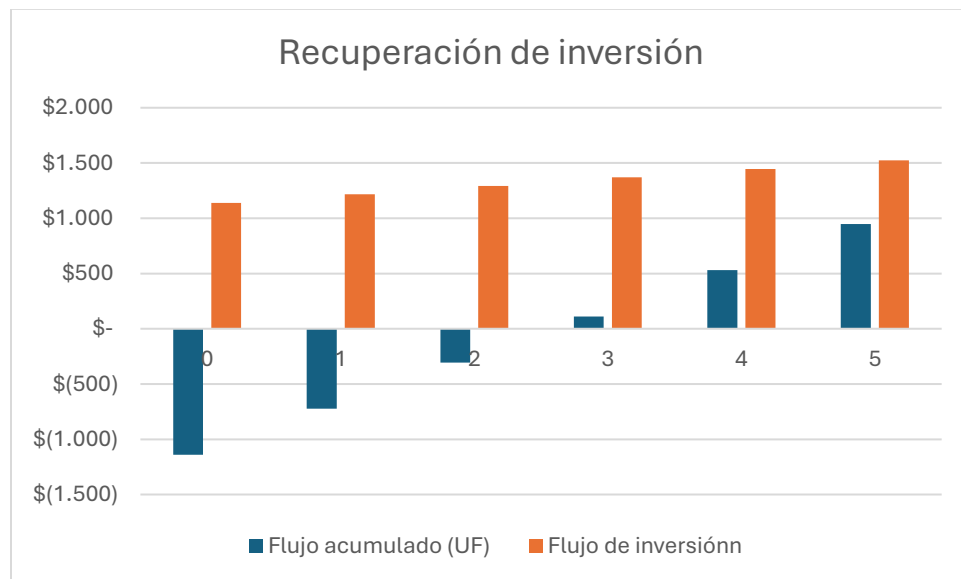


Gráfico 6 Retorno de inversión

5.- Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió evaluar, a nivel de ingeniería conceptual, la factibilidad técnica, energética y económica de implementar un sistema de precalentamiento de agua de alimentación para una caldera industrial de 9.000 kg de vapor por hora, mediante la recuperación de calor desde el retorno de condensado, aplicado al contexto de la industria alimenticia.

Desde el punto de vista técnico–operacional, se determinó que el aprovechamiento del calor residual contenido en el condensado representa una alternativa eficiente y técnicamente viable para mejorar el desempeño del sistema de generación de vapor. La solución propuesta permite aumentar de manera controlada la temperatura del agua de alimentación sin afectar la estabilidad de la operación ni la capacidad productiva de la caldera, manteniendo constante la producción de vapor requerida por el proceso. Asimismo, la incorporación de un intercambiador de calor de placas y elementos básicos de control se integra adecuadamente a la infraestructura existente, reduciendo la complejidad de implementación y los riesgos operacionales asociados.

En términos energéticos, el análisis demuestra que el aumento de la temperatura del agua de alimentación genera una reducción directa en la energía requerida para la producción de vapor, lo que se traduce en una disminución significativa del consumo de GLP. Esta mejora se ve reforzada por un mayor aprovechamiento del retorno de condensado, tanto en porcentaje de recuperación como en uso efectivo de su contenido térmico. Como resultado, se observa un aumento de la eficiencia vapor–combustible y una mejora global del desempeño energético de la sala de calderas, validada mediante indicadores operacionales medibles y representativos del proceso.

Desde la perspectiva económica, el proyecto presenta un comportamiento altamente favorable. El análisis basado en los indicadores CAPEX, OPEX y Payback permitió establecer que la inversión requerida es moderada y que los costos operacionales asociados al sistema son bajos, concentrándose principalmente en actividades de mantención preventiva. A partir de los ahorros generados por la reducción del consumo de GLP, se determinó un período de

recuperación de la inversión cercano a un año de operación, lo que posiciona al proyecto como una alternativa atractiva para instalaciones industriales que buscan mejoras de eficiencia energética con retornos de corto plazo.

Adicionalmente, el enfoque de evaluación mediante KPI operacionales permitió comparar de forma clara la situación actual y la situación mejorada, utilizando variables directamente observables en la sala de calderas, tales como producción de vapor, consumo de combustible, temperatura del agua de alimentación, retorno de condensado y energía térmica recuperada. Esta metodología facilita la comprensión del impacto del proyecto por parte del personal de operación y entrega una herramienta práctica para el monitoreo continuo del desempeño del sistema.

Finalmente, se concluye que la implementación de un sistema de precalentamiento de agua mediante recuperación de calor desde el condensado constituye una solución técnica y económicamente viable para la industria alimenticia, permitiendo reducir costos operacionales, mejorar la eficiencia energética y contribuir a una gestión más sostenible del uso de la energía. El presente trabajo establece una base sólida para avanzar hacia etapas posteriores de ingeniería básica y de detalle, así como para la eventual implementación del sistema en un entorno industrial real.

6.- Bibliografía

Agencia Chilena de Eficiencia Energética, & Chilealimentos A.G. (2012). *Manual de eficiencia energética en la industria de alimentos elaborados*. Santiago, Chile.

Comisión Europea. (2020). *Assessment methodology for excess heat recovery systems*. Smart Cities Marketplace. <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu>

ENAP – Empresa Nacional del Petróleo. (2024). *Estructura de precios de los combustibles en Chile: GLP*. <https://www.enap.cl/estructura-de-precios>

ENAP – Empresa Nacional del Petróleo. (2024). *Tabla de precios de paridad de importación de combustibles*. <https://www.enap.cl/informacion-comercial/tabla-de-precios-de-paridad>

International Energy Agency. (2018). *Energy efficiency in industry*. <https://www.iea.org>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.

InvestChile. (2021). *Industria alimentaria en Chile: Proyección y oportunidades*. Agencia de Promoción de la Inversión Extranjera, Gobierno de Chile.

Kern, D. Q. (1950). *Process heat transfer*. McGraw-Hill.

Ministerio de Energía de Chile. (2021). *Ley N° 21.305 sobre eficiencia energética*. Diario Oficial de la República de Chile.

Ministerio de Energía de Chile. (2024). *Reporte público 2024: Avances en los sistemas de gestión de energía (Ley N° 21.305)*. División de Energías Sostenibles, Gobierno de Chile.

Olavini, E. O., & Krause, G. (2020). Investment analysis of waste heat recovery systems installations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 811. <https://doi.org/10.3390/jmse8100811>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (5th ed.). McGraw-Hill.

Smith, R. (2016). *Chemical process design and integration* (2nd ed.). Wiley.

U.S. Department of Energy. (2021). *Waste heat recovery: Technology and opportunities in U.S. industry*. <https://www.energy.gov>

U.S. Department of Energy. (2021). *Methodology for evaluating cost-effectiveness of energy efficiency*. <https://www.energy.gov>