

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE PLAN DE MEJORA DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA PLANTA
SX-EW DE EMPRESA MINERA MANTOS BLANCOS**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de ingeniero con licenciatura en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Sr. Raúl Ignacio Zamora Saavedra.

Profesor Guía:

M. Ing. Cristian Enrique Cuadra Urbina.

RESUMEN

El presente documento busca definir una propuesta para mejorar la eficiencia térmica de la planta hidrometalúrgica SX-EW, en la empresa minera mantos blancos, ubicada a 56 kilómetros de Antofagasta en el norte de Chile.

Este documento se desarrollará de acuerdo con tres objetivos específicos los cuales permitirán cumplir con la propuesta. En primer lugar, se contextualiza el proceso y la importancia de los equipos térmicos en el proceso, se definen los parámetros operacionales y productivos de la planta (alcances, capacidad productiva), se realiza una evaluación sistemática en función a la eficiencia térmica del proceso y cuáles son los factores que más perjudican la eficiencia (calentador de agua, tanques de agua caliente, intercambiadores de calor, calidad del combustible, piping, etc.). en segundo lugar, se calcula eficiencia térmica de caldera de calefacción 410 para obtener variables de pérdidas en energía, además se evidencia la integridad mecánica de los equipos mediante inspecciones de terreno, evaluando sus impactos en seguridad y producción.

Por último y en consecuencia de los capítulos uno y dos se definirá la propuesta de mejora, con el objetivo de aumentar el rendimiento del sistema y el ahorro de combustible, esquematizando los principales puntos a mejorar en materias de diseño, limpieza y aislación. Finalmente se estiman los costos de inversión de las propuestas, se evalúa el desarrollo de las propuestas en relación con el ahorro energético de combustible por consecuencia de las mejoras y se detalla el beneficio obtenido y se compara con las proyecciones presupuestarias de los siguientes años.

INDICE

INTRODUCCION	7
OBJETIVOS.....	8
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y DATOS ECONOMICOS DE OPERACIÓN.....	9
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	10
1.1.1 Mantos blancos.....	10
1.1.2 Enfoque organizacional	11
1.1.3 El negocio	11
1.2 PRESUPUESTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA TERMICO.....	13
1.2.1 El proceso	13
1.2.2 Alcance y gasto operacional.....	14
1.2.3 Consumos de combustible	18
CAPÍTULO 2: EFICIENCIA TERMICA Y INTEGRIDAD MECANICA DEL SISTEMA DE CALEFACCION	21
2.1 EFICIENCIA TERMICA	23
2.1.1 Caldera de calefacción	24
2.1.2 Cálculos de eficiencia térmica	28
2.2 INTEGRIDAD MECANICA DEL SISTEMA DE CALEFACCION.....	37
2.2.1 Integridad mecánica de caldera 410	38
2.2.2 Integridad mecánica en tuberías y estanques.....	41
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA Y CONSIDERACIONES TECNICO -ECONOMICAS. ...	45
3.1 PROPUESTA DE MEJORA	46
3.1.1 Mejoras en Mantenimiento	47
3.1.2 Mejoras en Operación.....	51
3.2 CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS.....	53
3.2.1 Perdidas de energías en gases secos.....	53
3.2.2 Perdidas de energías por convección y radiación	58
3.2.3 Cambio de rodete y rodamientos en soplador	61
3.2.4 Mejora mecánica en estanque de agua caliente.....	63
3.2.5 Cambio de aislación térmica en piping	64
3.2.6 Beneficio	66
CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	72
BIBLIOGRAFIAS.....	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación geográfica Minera mantos blancos. _____	10
Figura 1-2. Logo comercial Capstone Copper _____	10
Figura 1-3. Valor del negocio planta concentradora. _____	12
Figura 1-4. Valor del negocio planta oxido _____	12
Figura 1-5. Planta SX-EW. _____	13
Figura 1-6. Costo de producción anual para una libra de cátodo de cobre. _____	14
Figura 1-7. Plan Budget 2022, planta Oxidos. _____	15
Figura 1-8. Gráfico circular de gastos operacionales. _____	16
Figura 1-9. Gráfico de costos Real vs Budget. _____	17
Figura 1-10. Gráfico apilado Consumos y gastos, Real vs Budget. _____	17
Figura 1-11. Consumos mensuales de combustible del calentador 410. _____	18
Figura 1-12. Tabla de variaciones de aumento de combustible últimos tres años. _____	19
Figura 1-13. Esquema secuencial de propuesta de mejora. _____	20
Figura 2-1. Conceptos en eficiencia de calefacción planta sx. _____	22
Figura 2-2. Esquema general del sistema de agua caliente. _____	23
Figura 2-3 vista general de la caldera 410. _____	25
Figura 2-4. Partes principales de una caldera pirotubular. _____	26
Figura 2-5. Esquema general del proceso de una caldera pirotubular _____	27
Figura 2-6. Datos técnicos generales de la caldera. _____	28
Figura 2-7. Parámetros primarios para cálculo de eficiencia térmica. _____	30
Figura 2-8. Parámetros secundarios para cálculo de eficiencia térmica. _____	31
Figura 2-9. Balances de masas y datos de entradas. _____	32
Figura 2-10. Resumen de datos de salida de las pérdidas de la caldera. _____	36
Figura 2-11. Gráfico de pérdidas. _____	37
Figura 2-12. Imágenes térmicas de caldera 410. _____	39
Figura 2-13. Condiciones subestándares de la caldera. _____	40
Figura 2-14. Imágenes de condiciones en cuadro de bombas para impulsión de agua caliente. _____	41
Figura 2-15. Líneas de descarga agua caliente y estanque de petróleo. _____	42
Figura 2-16. Tabla resumen de integridad mecánica operacional en el sistema de calefacción. _____	43
Figura 2-17. Esquema general de trabajo, coherencia de capítulos en función del objetivo _____	44
Fuente: Elaboración Exclusiva para trabajo de título. _____	44
Figura 3-1. Esquema resumen de propuestas de mejora. _____	46
Figura 3-2. Modelo de programación de actividades semanales en caldera 410. _____	47
Figura 3-3. Cuadro de propuestas de mejora en mantenimiento. _____	49
Figura 3-4. Cuadro de propuesta de mejora para unidad de operaciones planta SX. _____	52
Figura 3-5. Comportamiento térmico gases en cámara de combustión caldera pirotubular. _____	54
Figura 3-6. Eficiencia vs Temperatura en chimenea. _____	55
Figura 3-7. Trayectoria de gases de combustión en turbuladores. _____	56
Figura 3-8. Eficiencia v/s incrustaciones. _____	57
Figura 3-9. Eficiencia v/s Capa de hollín. _____	57
Figura 3-10. Presupuesto de mejora para pérdidas de gases secos. _____	58
Figura 3-11. Concreto refractario dañado en la caja de humos. Calentador babcock. _____	60
Figura 3-12. Presupuesto para mejora en pérdidas por convección y radiación. _____	61
Figura 3-13. Tendencias de vibraciones en soplador de calentador 410. _____	62
Figura 3-14. Presupuesto para mejora en soplador. _____	63

<i>Figura 3-15. Presupuesto estimado para reparación mecánica en estanque de agua caliente.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3-16. Red de tuberías con aislación térmica.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3-17. Costos en mejora de aislación térmica.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3-18. Resumen global de variables presupuestarias en propuestas de mejora.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3-19. Tabla de valores generales en variables de inversión y beneficio.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3-20. Grafico de tendencias de variables económicas en propuesta de mejora.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3-21. Tendencias de consumo en relación con la proyección catódica.</i>	<i>71</i>

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

SIGLAS:

EGS: Medio ambiente, gobernanza y social.

EW: Electrowinning (Electro obtención).

lb: libra.

MB: Mantos blancos.

OX: Oxidos.

PL: Planta.

PLS: Pregnant Leach Solution.

SX: Solvent Extraction (Extracción por solvente).

ROM: Run of Mine.

Kcal: kilocalorías, unidad de energía.

BBA: Bomba.

PCI: poder calorífico inferior.

PCS: poder calorífico superior.

TG: temperatura del gas.

CP: Calor específico.

NDT: Ensayos no destructivos, traducción de siglas al español.

SIMBOLOGÍA:

¢US\$: centavos de dólar.

lb: libra.

Δ : Diferencia entre variables. Símbolo matemático.

INTRODUCCION

Las plantas hidrometalúrgicas se caracterizan principalmente por la utilización de soluciones acuosas y orgánicas en sus procesos productivos, estas soluciones se encargan de extraer, transportar y entregar el mineral a los diferentes subprocesos que se definan, dependiendo del tipo de mineral procesado como óxidos, carbonatos, sulfatos, etc.

Para que esto sea posible, las plantas hidrometalúrgicas están diseñadas con diferentes sistemas y equipos que permiten el correcto funcionamiento del proceso, como equipos de impulsión para riego y transporte, depósitos de soluciones y estanques, intercambiadores de calor, calderas, válvulas, tuberías, entre otros.

Uno de los sistemas con mayor relevancia en el proceso productivo de las plantas hidrometalúrgicas, son los equipos térmicos para la generación de calor. Estos se definen como actores principales en el proceso de extracción por solvencia, pues la mayoría de las soluciones en estos procesos requieren temperaturas sobre las ambientales, para evitar de este modo, las cristalizaciones de la solución y separación de la mezcla.

Este proyecto de título busca elaborar una propuesta de mejora de eficiencia térmica en la planta SX-EW, de la minera mantos blancos ubicada en la región de Antofagasta en el norte de Chile. La planta extrae óxidos de cobre a través de lixiviación de mineral en bruto (ROM), la solución es trasladada a la planta SX-EW, en la cual se procesa para obtener cátodos de cobre fino.

Los últimos dos años la planta ha experimentado una baja en la eficiencia térmica del proceso y un aumento significativo en el consumo de combustible. Este proyecto definirá la problemática y los antecedentes que provocan la baja de eficiencia, mediante un cálculo de eficiencia indirecto que permita diagnosticar los puntos más críticos de la caldera y un análisis en la integridad mecánica en la disminución de eficiencia exterior. De este modo poder elaborar una propuesta que considere los aspectos económicos en su implementación y el beneficio que tendría en el proceso productivo.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Elaborar una propuesta de plan de mejora de eficiencia térmica para planta SX-EW, mediante análisis técnicos de eficiencia e integridad mecánica, que justifiquen la necesidad de mejora en el proceso.

Objetivos específicos

1. Analizar datos económicos de los presupuestos de operación y registros en consumo de combustibles para contextualizar y definir el gasto operacional en calefacción.
2. Calcular eficiencia térmica de la caldera 410 mediante método indirecto para determinar pérdidas de energías, e identificar defectos en la integridad mecánica del sistema con inspecciones en terreno para el diseño de mejora.
3. Evaluar los costos de inversión en función del ahorro en combustibles obtenido por las actividades de mejora, permitiendo conocer el beneficio total y proyectado para el negocio.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES Y ECONOMICOS DE LA
OPERACIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1.1 Mantos blancos

Mantos Blancos es una mina a cielo abierto ubicada en la región de Antofagasta, Chile, a una hora de las instalaciones portuarias de Antofagasta y Mejillones y de las fundiciones de cobre alto norte, en el norte de Chile (ver figura 1-1). Operada desde el año 2022 por Capstone Copper. (ver figura 1-2) La operación extrae y procesa minerales de sulfuro en plantas concentradora y minerales de óxidos en plantas SX-EW.



Figura 1-1. Ubicación geográfica Minera mantos blancos.

Fuente: Reporte técnico de mantos blancos, 2021.



Figura 1-2. Logo comercial Capstone Copper

Fuente: Reporte técnico de mantos blancos, 2021.

1.1.2 Enfoque organizacional

“Nos preocupamos profundamente por nuestra gente, el medio ambiente y las comunidades en las que operamos. Nos esforzamos por minimizar nuestra huella ambiental, brindar oportunidades locales de empleo y apoyar el desarrollo sostenible de nuestras comunidades”

La cita anterior resume el enfoque organizacional de la compañía Capstone Copper, que se define en los siguientes seis puntos:

- Prácticas de gobernanza y gestión.
- Supervisión de EGS por el directorio.
- Rendición de cuentas organizacional.
- Marco de gestión de riesgos organizacionales.
- Compensación ligada al desempeño
- Estrategia ESG.

1.1.3 El negocio

Mantos blancos extrae minerales de óxido y sulfuro, los cuales son procesados en diferentes plantas. El sulfuro de cobre es procesado en planta concentradora, la cual tiene una capacidad de 20.000 toneladas por día.

El concentrado de cobre representa el 70% del negocio de la empresa, la figura 1-3 muestra el valor del negocio de la planta concentradora. El esquema define las variables que se consideran para el cálculo como los factores externos e internos, el valor comercial del cobre fino y las toneladas procesadas, definiendo en valor monetario y costo que tiene la detención de algunos activos críticos o la detención total de la planta.

Por otra parte, la planta de Óxidos representa el 30% del valor total del negocio. Como resultado del agotamiento de las Reservas Minerales de óxido, el procesamiento en la planta de óxido disminuyó sustancialmente y solo se procesa la lixiviación de bajo grado en el botadero “ROM” de la mina. Es decir, el mineral que se lixivia no es chancado

previamente. Solo es mineral que no se utiliza en la planta de sulfuros. La figura 1-4, representa el valor del negocio de la planta óxidos, mostrando de igual manera que la planta concentradora sus principales variables para el cálculo final y definiendo el impacto monetario que tiene la detención de su equipo crítico.

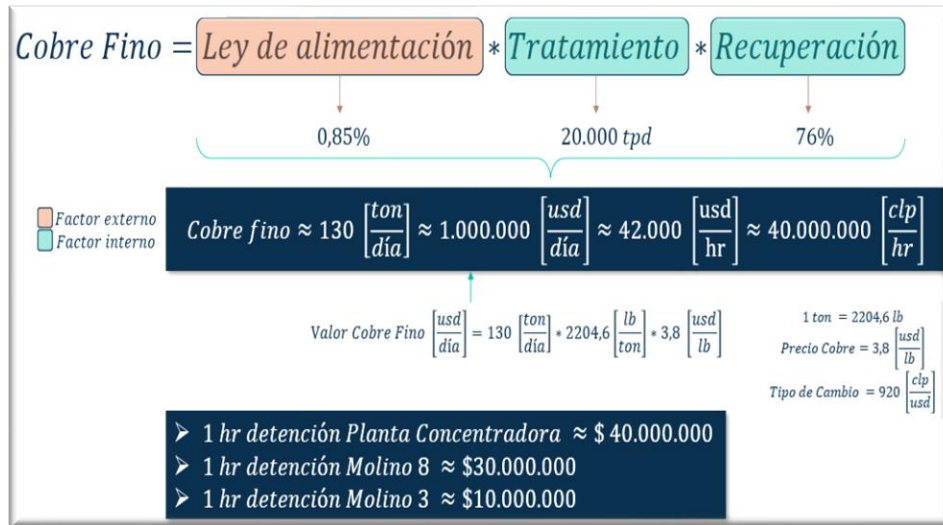


Figura 1-3. Valor del negocio planta concentradora.

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos en reunión de gestión Capstone Copper MB.

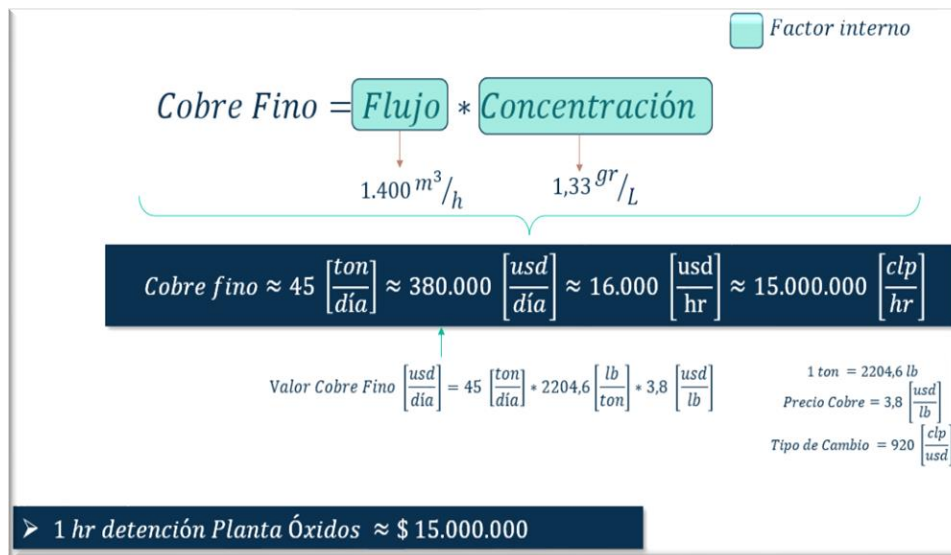


Figura 1-4. Valor del negocio planta óxido

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos en reunión de gestión Capstone Copper MB.

1.2 PRESUPUESTOS DE OPERACIÓN Y CONSUMOS DE COMBUSTIBLE

Para conocer y entender la problemática que este trabajo busca mitigar, primero debemos conocer algunos puntos relacionados al proceso, de esta manera poder contextualizar y abordar de manera más técnica la problemática en cuestión.

1.2.1 El proceso

La planta de óxidos comienza su proceso en las pilas de lixiviación, donde se riegan con diferentes soluciones ácidas con el objetivo de extraer el óxido de cobre del mineral apilado. El producto extraído PLS, es transportado a la planta SX-EW donde a través de un proceso de extracción con solventes, se obtiene el electrolito cargado, o también llamado electrolito rico. Esta solución tiene altas concentraciones de cobre. El electrolito pasa a los intercambiadores de calor para posteriormente ser filtrado.

Finalmente, la solución rica en cobre entra a las celdas de electroobtención, la cual mediante la electrólisis catódica permite que el cobre concentrado en el electrolito se deposite en láminas de acero inoxidable. Estas láminas o placas son llevadas a un proceso mecánico de separación la cual se almacena en paquetes para su posterior embarque. La figura 1-5, muestra de manera general, el proceso de la planta óxido, con sus procesos más relevantes.

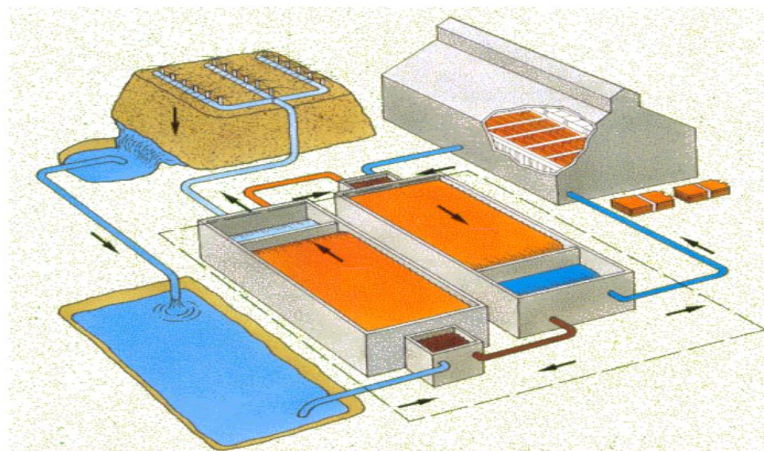


Figura 1-5. Planta SX-EW.

Fuente: Hidrometalurgia avanzada. DR German Caseres Arenas.

1.2.2 Alcance y gasto operacional

Para el año 2024, la planta de óxidos ha proyectado una producción anual de 11.100 toneladas de cátodos de cobre. Esta cifra ha disminuido desde el año 2020, debido a la baja concentración de mineral recuperada en el proceso, esto ha significado de igual manera una disminución en el budget anual

A pesar de la baja producción que se viene presupuestando, los costos de operación han aumentado significativamente, esto se debe, por un lado, a la pandemia mundial y los conflictos políticos-económicos internacionales que han provocado un aumento en el costo de combustibles y otros insumos de industria.

La figura 1-6 muestra el aumento notable que ha tenido el costo de producción por cada libra de cobre (c\$/lb), el monto a diferencia del año anterior se incrementó en un 300%.

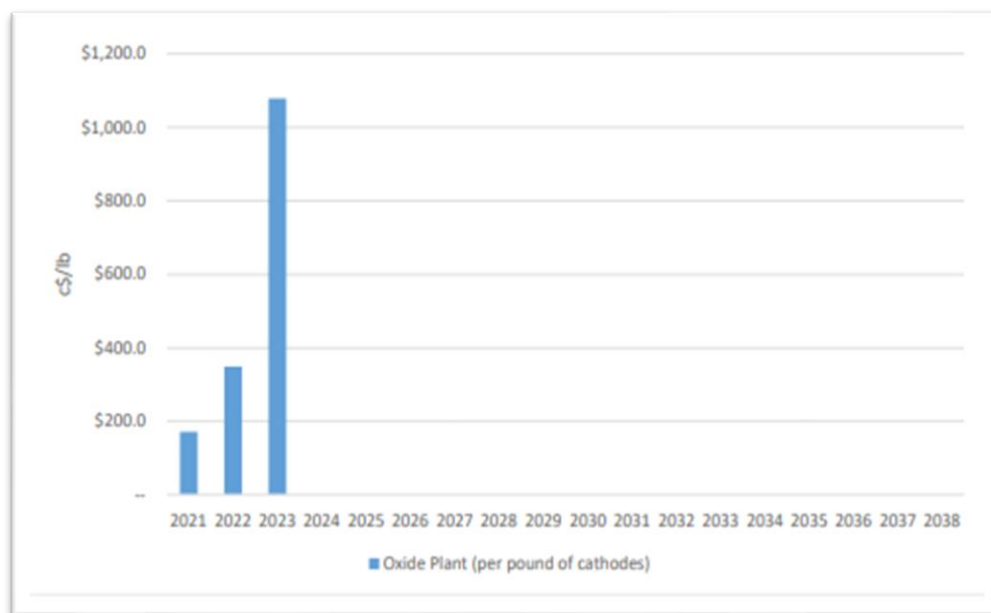


Figura 1-6. Costo de producción anual para una libra de cátodo de cobre.

Fuente: Reporte técnico anual 2021.Capstone Copper MB.

Los costos totales de operación de la planta de óxidos están compuestos por diferentes variables. Por ejemplo: mano de obra, electricidad, insumos de proceso y otros servicios. Estos costos son diferentes y se estiman en los planes budget de cada año según datos estadísticos realizados por una mesa técnica.

Conocer los costos de operación nos permiten tener una estimación en la producción real versus la presupuestada y en los gastos del proceso para el siguiente año. La figura 1-7, detalla a través de una tabla el costo y la producción total de operación en el año 2023 compuesta con cada elemento considerada al proceso. En los valores se precisan los costos por libra producida, esto permite tener una estimación según la variación del precio relativo del cobre.

Elemento	2023			
	Real		Budget	
	kUS\$	cUS\$/lb	kUS\$	cUS\$/lb
Mano de obra	2853	9,7	2967	10,7
Acido Sulfurico	44023	150,1	43000	155,3
Energia Electrica	5217	17,8	4350	15,7
Mantenimiento	4527	15,4	4851	17,5
Agua industrial	4964	16,9	4569	16,5
Otros consumos y servicios	9284	31,7	7190	26,0
<i>Manteriales de operación</i>	2234	7,62	2150	7,8
<i>Reactivos (Co, Fe, Guar, etc.)</i>	984	3,36	748	2,7
<i>Extractante</i>	598	2,04	266	1,0
<i>Diluyente</i>	627	2,14	380	1,4
Combustibles	2135	7,28	850	3,1
Otros Servicios	1146	3,91	1296	4,7
Otros gastos	1560	5,32	1500	5,4
Gastos operacionales	\$70.868	242	\$ 66.927	241,7
Produccion Catodica(Tcuf)	13300,00		12560,00	

Figura 1-7. Plan Budget 2022, planta Oxidos.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Datos obtenidos de en base de datos operacionales MB PL OX.

Las variables representadas en la tabla anterior componen los costos de operación totales de la planta de óxidos. Se puede observar que cada elemento se define en costos reales y costos presupuestados, esto nos permite conocer la desviación del gasto con

respecto a lo planificado y también destacar los elementos que requieren mayor análisis para optimizar los gastos operacionales.

En la tabla existen elementos de alto costo como el ácido sulfúrico, si lo llevamos a porcentaje, correspondería a un 62% del total (ver figura 1-8). Si bien representa un valor muy elevado con respecto a los otros gastos, este insumo es asumido por la planificación puesto que no se puede controlar ni disminuir debido que su precio es relativo y depende netamente del mercado exterior.

Sin embargo, un indicador que si representa un peligro al plan de presupuesto son aquellos gastos que se alejan del budget, pues provocan un desorden en el presupuesto que no está considerado, provocando un reajuste o incremento de presupuesto no esperado para la operación del proceso.



Figura 1-8. Gráfico circular de gastos operacionales.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Datos obtenidos de en base de datos operacionales MB PL OX.

Si graficamos la tabla 1-7, podemos observar el comportamiento de los costos reales en relación con lo presupuestado, de esta manera conocer los elementos que alteran el plan de presupuesto. La figura 1-9 muestra un gráfico de columnas apiladas que representan los

costos reales (color rojo) y los costos presupuestados (color verde), esto permite observar diferencias entre el presupuesto estimado y el gasto real de la operación.

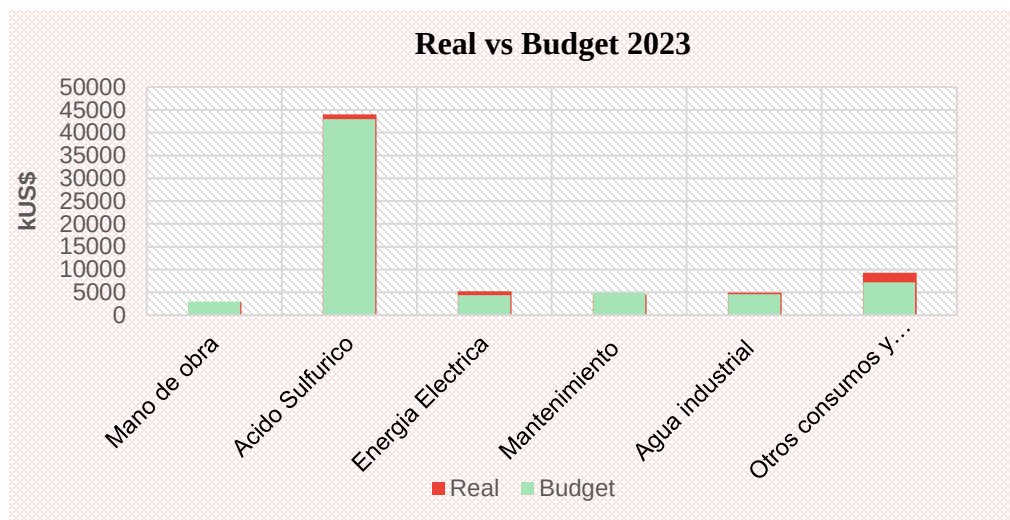


Figura 1-9. Gráfico de costos Real vs Budget.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Datos obtenidos de en base de datos operacionales MB PL OX.

Del grafico anterior podemos concluir lo siguiente: el costo que más se aleja del presupuesto es el de consumos y servicios, puesto que presenta casi un 56% más que el budget planificado. Esto nos permite saber cuáles serían las variables donde más se eleva el costo no presupuestado. Siguiendo la misma lógica de análisis, también podemos analizar gráficamente las variables que contienen los gastos de consumo, esto se define en la figura 1-10.

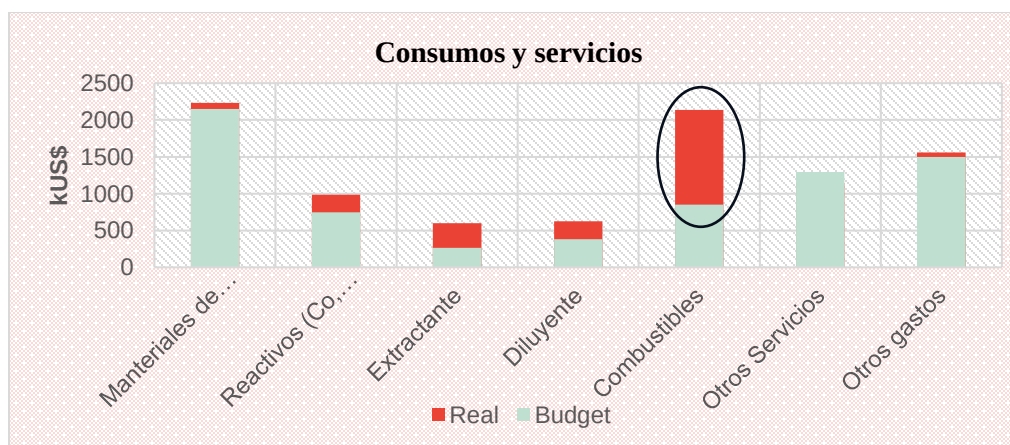


Figura 1-10. Gráfico apilado Consumos y gastos, Real vs Budget.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Datos obtenidos de en base de datos operacionales MB PL OX

La grafica anterior señala de manera explícita, que el gasto más alarmante que afecta al budget planificado es el consumo de combustible, si bien existen otras variables que se escapan notoriamente del budget, se discrimina que el consumo de combustible requiere mayor atención, el circulo negro destaca la diferencia significativa en el gasto real, encontrando muy por encima del budget.

Junto con toda la información anterior, podemos abordar de mejor manera la problemática, puesto que ya se justificaron todos los antecedentes económicos en relación con el gasto real y el planificado.

1.2.3 Consumos de combustible

Mediante reportes técnicos, la planta de óxidos ha registrado un aumento significativo en el consumo de combustible (petróleo) para la generación de agua caliente. El sistema de agua caliente cumple un rol fundamental en el proceso de la planta, pues se encarga de proporcionar calor a las soluciones ricas en cobre (electrolito) y de esta manera lograr un proceso más efectivo además abastece las líneas de agua caliente para el lavado de cátodos en diferentes etapas del proceso

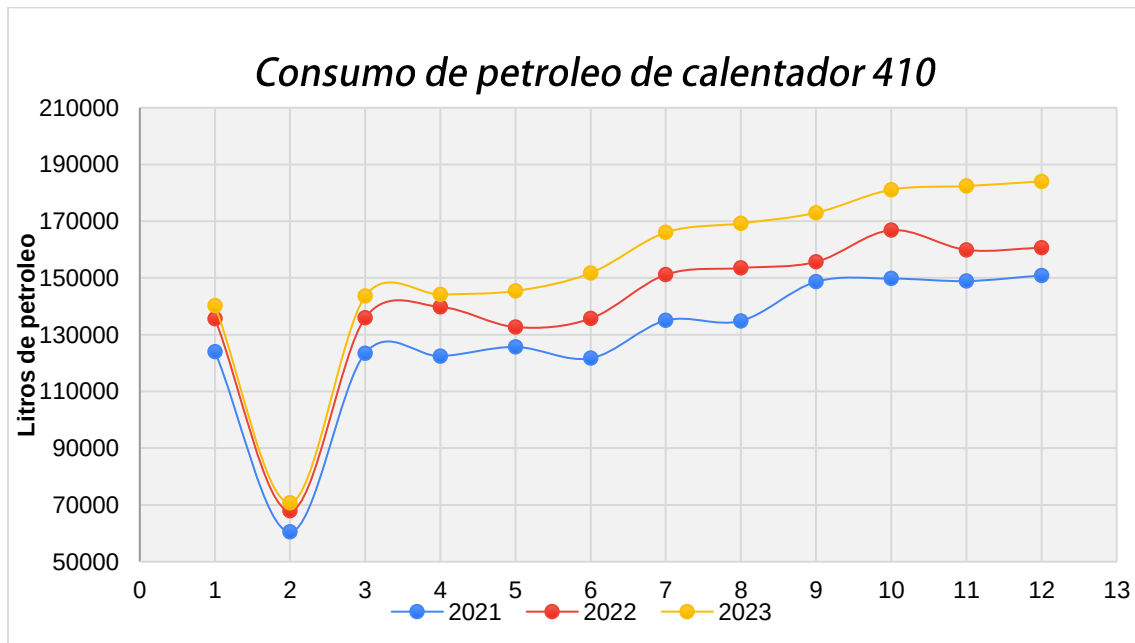


Figura 1-11. Consumos mensuales de combustible del calentador 410.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Datos obtenidos de en base de datos operacionales MB PL OX.

Si bien la producción anual de cobre de cada año ha ido en decrecimiento, el consumo de petróleo ha ido en aumento desde el año 2021. Estos valores se defienden en la figura 1-11, la cual muestra el consumo de combustible de los años 2021, 2022 y 2023.

La gráfica explica la tendencia de incremento que ha tenido en el consumo, solo disminuyendo abruptamente en el mes de febrero, donde se realiza la detención de planta anual, para las mantenciones mayores, sin embargo, los meses siguientes aumenta la tendencia llegando a un total de 1.851.747 de litros consumidos durante todo el año 2023, esto significa que el calor generado en la caldera 410 no se aprovecha en su totalidad a tal punto de requerir más combustible para el correcto funcionamiento de la planta.

2021		2022		2023	
Mes	Litros/Mensuales	Mes	Litros/Mensuales	Mes	Litros/Mensuales
Enero	124040	Enero	135672	Enero	140200
Febrero	60456	Febrero	67902	Febrero	70800
Marzo	123487	Marzo	135965	Marzo	143570
Abril	122456	Abril	139784	Abril	144170
Mayo	125689	Mayo	132686	Mayo	145429
Junio	121698	Junio	135704	Junio	151745
Julio	135049	Julio	151180	Julio	166040
Agosto	134865	Agosto	153509	Agosto	169246
Septiembre	148674	Septiembre	155673	Septiembre	172997
Octubre	149788	Octubre	166843	Octubre	181105
Noviembre	148909	Noviembre	159894	Noviembre	182396
Diciembre	150894	Diciembre	160673	Diciembre	184049
total	1546005	total	1695485	total	1851747
AÑO	TOTAL LITROS	VARIACION			
2021	1546005	5%			
2022	1695485	9,67%			
2023	1851747	9,22%			

Figura 1-12. Tabla de variaciones de aumento de combustible últimos tres años.

Fuente: tabla elaborada según datos de reporte anual planta óxidos.

La tabla 1-12, representa la variación porcentual en el aumento del consumo de combustible durante los últimos tres años, donde se observa un incremento significativo en relación con el año anterior, pues el consumo sigue en aumento a pesar de la baja productiva presupuestada para el año 2023 en adelante, de este modo se espera que siga en aumento a pesar de la producción en declive.

El calentador Babcock o caldera 410, es el equipo responsable de la generación de agua caliente para el proceso. Este equipo es de alta criticidad debido a su función de estar suministrando calor de manera continua al proceso, Su falla total significaría una detención inmediata y pérdidas totales en la producción. Este equipo y su alcance operacional se detallará en el segundo capítulo, donde se explicará el circuito cerrado del agua caliente y los equipos estáticos para el intercambio de calor.

En relación con la problemática, podemos concluir un problema de eficiencia térmica en el sistema de agua caliente, esto se justifica por el incremento significativo de combustible para la generación de agua caliente, aun con la baja de producción anual esa cifra de consumo sigue aumentando, sin tener otro antecedente técnico que justifique su aumento. Es por eso que la obra busca proponer alternativas de mejores enfocadas hacia la eficiencia térmica del de este sistema.

El esquema de la figura 1-13 representa la secuencia básica para el diseño de la propuesta de mejora. Ya habiendo analizado los datos económicos en consumo y presupuesto para contextualizar y definir un diagnóstico, en los siguientes capítulos la propuesta busca determinar causas mediante calculos y mediciones, de esta manera diseñar según las variables obtenidas y finalmente evaluar la factibilidad de la propuesta entregada.

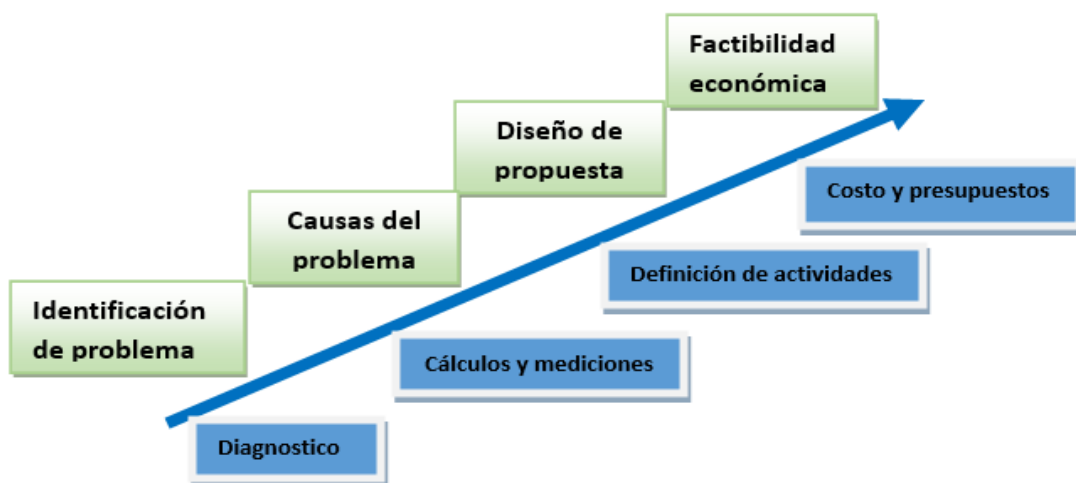


Figura 1-13. Esquema secuencial de propuesta de mejora.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

CAPÍTULO 2: EFICIENCIA TERMICA Y INTEGRIDAD MECANICA DEL
SISTEMA DE CALEFACCION

Para tener una visión sistemática de la eficiencia térmica del proceso, tenemos que definir dos puntos de alta relevancia en el sistema de agua caliente: la eficiencia térmica del calentador 410 y la integridad mecánica del sistema. Con el objetivo de evidenciar las debilidades en cada aspecto y tomar los datos como base para la elaboración de la propuesta, de este modo la idea de relación entre la eficiencia térmica de la caldera 410 y la integridad mecánica es netamente por trabajar con el mismo fluido que aumenta y disminuye su temperatura en las diferentes etapas del sistema (ver figura 2-1).



Figura 2-1. Conceptos en eficiencia de calefacción planta sx.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

En relación con lo anterior podemos definir que el trabajo de búsqueda de las causas y defectos de la problemática debe estar enfocado en la eficiencia térmica del equipo 410 y de los sistemas mecánicos consiguientes pues estos se encierran en un mismo valor y el defecto de uno, afecta directamente al otro. A modo introductorio de este capítulo, se desarrollarán dos ítems: eficiencia térmica, donde se realizarán cálculos de eficiencia térmica para determinar las pérdidas de energía en la caldera y se realizara una evaluación técnica de la integridad mecánica del sistema, con el objetivo de evidenciar defectos críticos que perjudiquen el proceso.

La figura 2-2 muestra el esquema general del sistema de calefacción de la planta mediante bloques que representan los equipos. Para profundizar más en detalle, podemos definir el esquema de la siguiente manera:

1. El fluido (63°C) es impulsado por bombas desde el estanque de agua caliente hasta el calentador de agua (línea azul).
2. El calentador de agua distribuye el fluido térmico hacia los intercambiadores 030 y 020 en diferentes proporciones (línea roja)
3. El intercambiador 020 intercambia calor con electrolito rico (línea verde) que continuamente intercambia calor con el electrolito pobre en el intercambiador 010. y retorna nuevamente al estanque de agua caliente. el electrolito pobre retorna con más temperatura debido a que aumentan las concentraciones de ácido en la electrolisis.
4. El intercambiador 030 trabaja con agua fría e intercambia calor directamente para ser aprovechado en líneas de trabajos como la cámara de lavado de la maquina despegadora de cátodos, la nave de cosecha y el patio estanque. (línea roja).

De lo anterior podemos concluir que el sistema está en constante intercambio de calor con los fluidos, y al mismo tiempo en retorno al estanque para cumplir el ciclo nuevamente. El suministro de agua caliente debe ser constante en el proceso, el sistema no puede permitir tiempos de detención muy prologadas de este equipo, pues esto significaría una cristalización general por la falta de calor en los fluidos electrolíticos y una perdida significativa al negocio.

2.1.1 Caldera de calefacción

La caldera de calefacción 410 de la planta es el principal y único equipo para la generación de agua caliente. La caldera es de tipo pirotubular, esto quiere decir que los gases provenientes de la combustión pasan atreves de tubos que están rodeados de agua, de esta manera se consigue un intercambio de calor constante entre los fluidos.

La figura 2-3 muestra la caldera de agua caliente de la planta SX-EW, donde se observa la unidad de combustión, la caja de humos principal y el quemador



Figura 2-3 vista general de la caldera 410.

Fuente: Elaboración propia para trabajo de título. Imagen tomada en terreno planta sx, mantos blancos.

Este equipo definido anteriormente como una caldera igneotubular, se diferencia de una caldera de vapor principalmente por su utilización, pues este se utiliza para calentar agua y no para la generación de vapor, en otras aplicaciones las calderas de vapor se utilizan para entregar energía directa a un proceso, como mover una turbina o configuraciones más complejas. Este equipo en cambio es utilizado solo para calefaccionar el proceso de manera continua y sin alteraciones en su trabajo.

Como mencionábamos anteriormente este equipo es el más crítico del proceso de calefacción y es por eso, que su confiabilidad e integridad mecánica son muy relevantes en su funcionamiento. En esta obra se busca principalmente las partes más afectadas que evitan una eficiencia térmica completa y evidenciar de manera cuantitativa los problemas raíz de cada una de las fallas que veremos más adelante en el desarrollo de la unidad.

Este tipo de caldera se compone de diferentes partes, los cuales son de mucha relevancia para el proceso. Las partes principales se definen en figura 2-4.

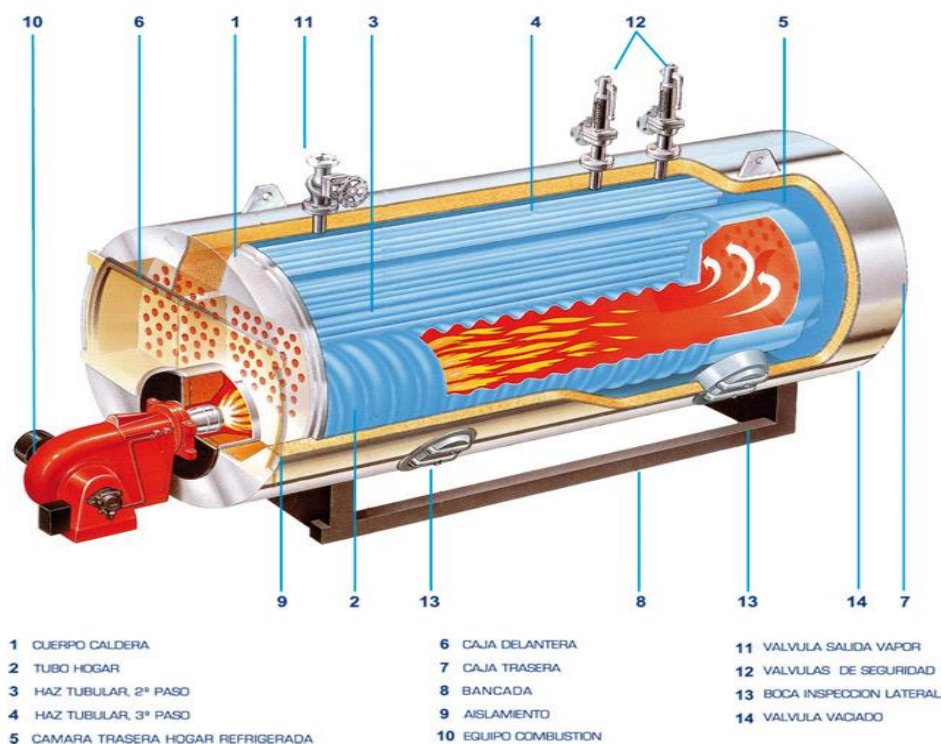


Figura 2-4. Partes principales de una caldera pirotubular.

Fuente: SOGECAL Catálogos de calderas de climatización.

La figura anterior muestra los componentes principales de las calderas ígneo-tubulares. Ya teniendo conocimiento de las partes y componentes principales de la caldera piro tubular, podemos definir de manera más específica y secuencial el proceso de funcionamiento de estos equipos. El proceso para calefaccionar sigue el siguiente orden:

1. El agua ingresa desde el estanque de agua caliente. Este almacena el agua de retorno desde los intercambiadores u otros equipos del sistema con el objetivo de evitar pérdidas de calor.
2. Cuando la caldera se llena de agua, comienza la combustión. La combustión se consigue mediante la mezcla de aire, calor y el combustible los cuales provocan la ignición gracias al quemador principal

3. Los gases de la ignición provenientes del quemador son conducidos desde la cámara hogar hasta una serie de tubos que atraviesan longitudinalmente la caldera, esta configuración de tubos cumple una especie de serpentín donde ocurre la convección de los gases a través de los tubos, lo que permite que los humos sigan las series de tubos.
4. Estos tubos al estar rodeados de agua crean un intercambio de calor constante con el medio, logrando calefaccionar el agua.
5. El agua caliente sale al proceso y los gases de la combustión son liberados por la chimenea principal.

De acuerdo con lo anterior podríamos definir a las calderas como verdaderos intercambiadores de calor, que buscan de manera eficiente utilizar la energía generada para calentar el fluido. La figura 2-5 define el proceso descrito anteriormente mediante esquemas resumidos.

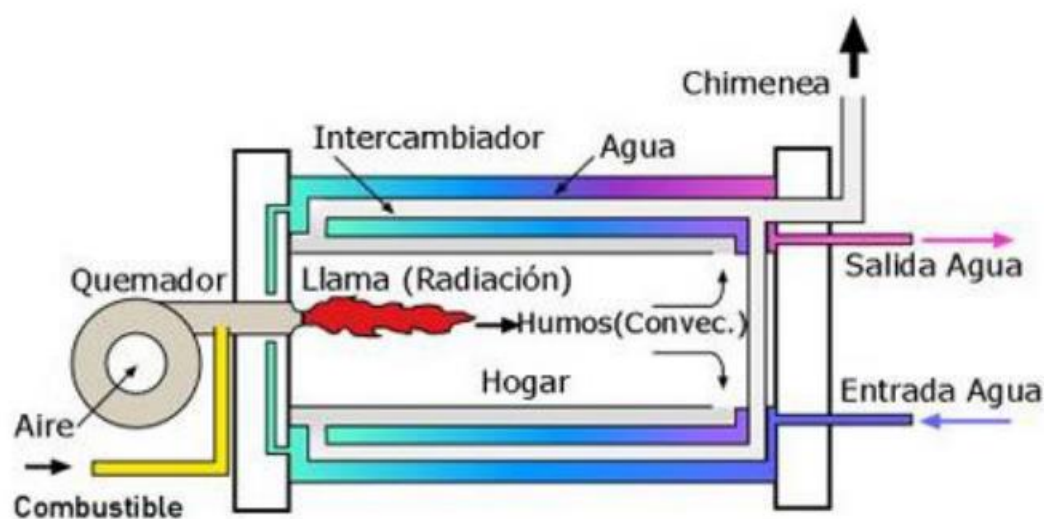


Figura 2-5. Esquema general del proceso de una caldera pirotubular

Fuente: Repositorio USM plan de mantenimiento y certificación de calderas según nuevo decreto 10.

Cada caldera posee diferentes parámetros de trabajo, estos se definen como presiones de trabajos y presiones máximas, capacidades volumétricas, eficiencia térmica etc. Estos parámetros dependerán directamente del proceso y los requerimientos operacionales, es por eso que se necesita conocer bien los cálculos directos de rendimiento,

flujo volumétrico y cuanto calor debo suministrar al proceso, con esa información se puede comenzar a diseñar un sistema térmico.

Volviendo a nuestra caldera de calefacción, la siguiente figura 2-6 muestra una tabla donde se definen los datos técnicos generales del equipo.

Caldera de calefaccion 410	
FABRICANTE	VAPOR INDUSTRIAL S.A.
MODELO	IGNEOTUBULAR
POTENCIA TERMICA	3.200.000 kcal/h (aprox)
NUMERO DE FABRICACION	410005
N° DE REGISTRO	SIN NUMERO
AÑO DE FABRICACION	2004
PRESION MAX. DE TRABAJO	7 kgf/cm ²
TEMP. MAX. TRABAJO	100°C
COMBUSTIBLE	Petroleo diesel N° 2
EFICIENCIA FABRICANTE	89% +/- 1% (pcs)
SUPERF. CALEFACCION	160 m ²

Figura 2-6. Datos técnicos generales de la caldera.

Fuente: Datos obtenidos de la placa de características y registros técnicos de la planta óxidos.

Los datos técnicos resumidos en la tabla nos permiten definir el alcance de la caldera, además muestra información relevante que nos servirá para los cálculos de eficiencia térmica expuestos en el siguiente ítem.

2.1.2 Cálculos de eficiencia térmica

Al principio del capítulo definíamos la eficiencia térmica como la razón entre el trabajo neto realizado y el calor absorbido por el sistema durante un ciclo. Esta definición de eficiencia térmica se puede representar de dos métodos principales: método directo y método indirecto.

- **El método directo** define la eficiencia térmica de manera general, utilizando las diferencias de entalpías, el PCI y los flujos masicos del combustible y agua (o vapor). Este método permite obtener la eficiencia térmica de un sistema de manera rápida y sencilla. Sin embargo, la lectura final de este método no nos permite conocer las fuentes de perdidas pues solo se limita al cálculo general de la eficiencia. Su ecuación se define de la siguiente manera:

$$Eficiencia (\%) = \frac{mvapor(\frac{kg}{h})(\Delta entalpia)(\frac{kcal}{kg})}{mcombustible(\frac{kg}{h})PCI(\frac{kcal}{kg})} \times 100\%$$

- **El método indirecto** se basa principalmente en la sumatorias de perdidas provenientes de diferentes partes de la caldera. El método busca restar las sumatorias a la totalidad del rendimiento. Una ventaja de utilizar el método indirecto es que nos permite conocer las partes de donde provienen las pérdidas de calor, de este modo simplifica la toma de decisiones para optimizar estas problemáticas. Su cálculo está definido con la siguiente ecuación:

$$Eficiencia \% = 100\% - \sum_i perdidas(\%)$$

las pérdidas que se calculan en el método indirecto son definidas con diferentes fórmulas, cada una contiene diferentes variables para el cálculo. las perdidas varían en función al tipo de caldera, entonces las perdidas calculadas representan los puntos que más afectan a la eficiencia.

Las perdidas más comunes en el cálculo de eficiencia térmica son: las perdidas por radiación y convección, perdidas por combustión o humos secos, perdidas por purgas y perdidas por agua formada por nitrógeno. Estas pérdidas son las más utilizadas, pero dependerán de las diferentes variables de la caldera.

El método que se utilizará para determinar la eficiencia térmica de la caldera 410 será el método indirecto, pues nos permite conocer las pérdidas mayores y abordar de manera más segura los focos de atención que provocan pérdidas en el sistema.

Antes de comenzar con los cálculos debemos conocer los parámetros primarios y secundarios que se utilizarán para los cálculos. Las figuras 2-7 y 2-8 definen los parámetros primarios y secundarios de la caldera respectivamente. Estos datos están basados en cálculos técnicos medidos por parte del laboratorio de la empresa y empresas colaboradoras que han presentado mediciones de gases de la caldera con el objetivo de definir pérdidas de energías y calcular balances de energías para el equipo los cuales.

El alcance de este trabajo no es detallar los balances de energías ni mediciones de humos, es por eso que solo se definirán como parámetros establecidos para la realización de los cálculos.

N°	PARAMETRO	ABREVIACION	UNIDAD	TIPO	MB
1	Presión atmosférica	Pa	Bar	PRIMARIA	0,921
2	Flujo másico de agua	ma	kg/h	PRIMARIA	101.832
3	Flujo volumétrico de combustible	vc	m ³ /h	PRIMARIA	975,31
4	Flujo másico de combustible	mc	kg/h	PRIMARIA	340,56
5	Poder calorífico superior	PCS	kcal/h	PRIMARIA	10.900
6	Composición del combustible (C)	%C	kg/kg	PRIMARIA	0,82
7	Composición del combustible (H)	%H	kg/kg	PRIMARIA	0,11
8	Composición del combustible (O)	%O	kg/kg	PRIMARIA	0,057
9	Composición del combustible (S)	%S	kg/kg	PRIMARIA	0,004
10	Composición del combustible (N)	%N	kg/kg	PRIMARIA	0,002
11	Composición del combustible cenizas	%ash	kg/kg	PRIMARIA	0,004
12	Composición del combustible agua	%H ₂ O	kg/kg	PRIMARIA	0,003
13	Temperatura gases en combustión	Tg	°C	PRIMARIA	212,8
14	Temperatura entrada de agua	Te	°C	PRIMARIA	62
15	Temperatura salida de agua	Ts	°C	PRIMARIA	82
16	Exceso de aire	EA		PRIMARIA	1,2
17	Composición de gases combu. (CO ₂)	%CO ₂	%	PRIMARIA	13,1
18	Composición de gases combu. (O ₂)	%O ₂	%	PRIMARIA	3,4
19	Humedad relativa ambiente	HR	%	PRIMARIA	24,2
20	Temperatura promedio ambiente	Ta	°C	PRIMARIA	30

Figura 2-7. Parámetros primarios para cálculo de eficiencia térmica.

Fuente: Informe técnico para planta óxidos.

N°	PARAMETRO	ABREVIACION	UNIDAD	TIPO	MB
1	Altura geografica	Ag	m.s.n.m	SECUNDARIA	815
2	presion de operación de caldera	Pt	kgf/cm2	SECUNDARIA	2
3	Densidad del combustible	Dc	mg/m3	SECUNDARIA	0,86
4	Temperatura superficial cajas de humos	Tsc	°C	SECUNDARIA	188,5
5	Superficie caja de humos	Sc	m2	SECUNDARIA	6,30
6	Temperatura superficial manto	Tsm	°C	SECUNDARIA	48,2
7	Superficie manto	Sm	m2	SECUNDARIA	56,4
8	Calor especifico de agua a presion constante	Cp	kcal/kg.°c	SECUNDARIA	1

Figura 2-8. Parámetros secundarios para cálculo de eficiencia térmica.

Fuente: Informe técnico para planta óxidos.

Habiendo definido los parámetro primarios y secundarios podemos definir los cálculos tabulados del balance de masas de acuerdo con las mediciones de gases realizadas por empresas de apoyo. Los balances de masas mostrados en la figura 2-9, definen el resumen de la composición química de los gases liberados en la combustión.

La medición detalla la cantidad de gases secos y húmedos presentes en la combustión. Es importante comprender que las mediciones mostradas en la figura ya están balanceadas y sirven de referencia para los cálculos de pérdidas.

La figura también muestra las variables de entradas (inputs) del sistema, estos datos son fundamentales para los cálculos de pérdidas pues define variables muy relevantes como el poder calorífico, las entalpías los flujos masicos de los fluidos, etc. los datos tabulados fueron calculados en relación con el funcionamiento normal y con carga máxima de la caldera, en un ciclo continuo de tres horas.

El calentador 410, trabaja bajo ciclos de 2 a 3 horas continuas. En condiciones ideales siempre se busca que un equipo no tenga detenciones, esto debido a que provoca choques térmicos en sus sistemas, lo que afecta la estructura de los materiales, provocando grietas en los tubos y revestimientos. Otro factor relevante para el correcto funcionamiento de una caldera es la manera de operar el equipo, pues al momento de operar una caldera se debe considerar el tiempo que estuvo detenida e ir aumentando gradualmente las temperaturas para no sobre exigir el sistema. Esas consideraciones se explicarán más adelante.

Balance másico	Variable	Peso de aire y gases	Volumen de aire y gases
		kg/kg	Nm3/kg
	Aire real húmedo	15,449	11,994
	Gases secos	15,358	11,412
	Gases húmedos	16,34	12,639
Entradas	Variable	Datos	Unidades
	Presion atm.	0,921	bar
	Humedad relativa	24%	%
	Temperatura ambiente	30	°C
	Densidad del combustible	0,86	gr/m3
	Flujo volum. Combustible	0,396	m3/h
	Flujo de combustible	340,5	kg/h
	PCS	10.900	kcal/kg
	PCI	10.200	kcal/kg
	Temp. ingreso de agua	62,8	°C
	Temp. egreso de agua	82	°C
	Calor especifico del agua	1,000	kcal/kg°C
	Flujo masico del agua	101.800,00	kg/h
	Temp. Gases de escape	212,5	°C
	% de O2 en gases secos escape	3,50%	%
	Diferencias de entalpias	28,54	kcal/kg
	Superficie aislada manto	56,4	m2
	Temp. Promedio manto	48,2	°C
	Superficies cajas de humos	6,3	m2
	Temp. Promedio cajas		°C
	Pinch point	130,5	°C
	Temp. Minima chimenea	140	°C

Figura 2-9. Balances de masas y datos de entradas.

Fuente: Mediciones de monitoreo para caldera 410, planta oxido MB.

Con toda la información tabulada. Las pérdidas para determinar la eficiencia térmica del sistema utilizando el método indirecto se defienden con las siguientes ecuaciones:

a) *Perdidas por humedad en gases:*

Podemos definir la humedad generada por el hidrogeno en la combustión, su cálculo de pérdidas se define de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$QH2 = 9 \left(\frac{kg \ H2O}{kg \ H2} \right) * \%H2_{\text{peso}} * \left(500 \frac{kcal}{kgH2O} + C_{ph2o} * (T_{\text{gases}} - T_{\text{amb}}) \right)$$

$$QH2 = 9 \left(\frac{kg \ H2O}{kg \ H2} \right) * 0,1 * \left(500 \frac{kcal}{kgH2O} + 1 \left(\frac{kcal}{kg * ^\circ C} \right) * (212,7^\circ C - 30^\circ C) \right)$$

$$QH2 = 614,43 \left(\frac{kcal}{kgdiesel} \right)$$

Para obtener el porcentaje de la perdida, debemos dividir por el PCI:

$$QH2\% = \frac{614,43 \left(\frac{kcal}{kgdiesel} \right)}{10.200 \left(\frac{kcal}{kg} \right)} * 100$$

$$QH2\% = 6,02\%$$

b) *Perdidas por gases secos:*

$$Qgs = mgs \left(\frac{kg}{kg} \right) * Cpgases \left(\frac{kcal}{kg * C^{\circ}} \right) * (Tg - Tamb)$$

$$Qgs = 15,350 \left(\frac{kg}{kg} \right) * 0,232 \left(\frac{kcal}{kg * C^{\circ}} \right) * (212^{\circ}C - 30^{\circ}C)$$

$$Qgs = 648,47 \left(\frac{kcal}{kgdiesel} \right)$$

Para obtener el porcentaje de la perdida, debemos dividir por el PCI:

$$Qgs\% = \frac{648,47 \left(\frac{kcal}{kgdiesel} \right)}{10.200 \left(\frac{kcal}{kg} \right)} * 100$$

$$Qgs\% = 6,35\%$$

c) *Perdidas por radiación y convección manto:*

Las pérdidas por radiación y convección la podemos definir de manera simple, como el calor absorbido por los medios en donde los gases intercambian calor por radiación y convección, generalmente estos cálculos se realizan en función al manto aislado de la caldera y en las cajas de humos de lado frente y posterior, debido a que es en estos puntos donde se produce ese tipo de transferencia de calor

Los valores de q se calcularon en base a iteraciones, donde se define como la relación de trabajo sobre cada metro cuadrado.

$$Q_{radyconv} = Superf(m^2) * q \left(\frac{W}{m^2} \right) * 0,86 \left(\frac{kcal}{Wh} \right)$$

$$Q_{radyconv} = 56(m^2) * 2.685,97 \left(\frac{W}{m^2} \right) * 0,86 \left(\frac{kcal}{Wh} \right)$$

$$Q_{radyconv} = 129.356 \left(\frac{kcal}{h} \right)$$

Para obtener la pérdida en termino porcentuales, se debe calcular la razón entre el valor de pérdida obtenido y la potencia térmica de la caldera, mostrado anteriormente en la figura 2-5

$$Q_{radyconv}\% = \frac{129.356 \left(\frac{kcal}{h} \right)}{3.200.000 \left(\frac{kcal}{h} \right)} * 100$$

$$Q_{radyconv}\% = 4,04\%$$

d) *Perdidas por radiación y convección cajas de humos:*

$$Q_{radyconv} = Superf(m^2) * q\left(\frac{W}{m^2}\right) * 0,86\left(\frac{kcal}{Wh}\right)$$

$$Q_{radyconv} = 12,6(m^2) * 14.000\left(\frac{W}{m^2}\right) * 0,86\left(\frac{kcal}{Wh}\right)$$

$$Q_{radyconv} = 151.704\left(\frac{kcal}{h}\right)$$

De la misma manera que en la pérdida del manto, debemos calcular la razón entre el valor de pérdida obtenido y la potencia térmica de la caldera, mostrada en la figura 2-5.

$$Q_{radyconv}\% = \frac{151.704\left(\frac{kcal}{h}\right)}{3.200.000\left(\frac{kcal}{h}\right)} * 100$$

$$Q_{radyconv}\% = 4,7\%$$

e) *Pérdidas totales método indirecto:*

En función a la formula general del método indirecto y las perdidas calculas del sistema podemos calcular la pérdida total bajo la siguiente ecuación:

$$Eficiencia \% = 100\% - \sum_i perdidas(\%)$$

$$Eficiencia \% = 100\% - \sum_i 6,02\% + 6,35\% + 4,04\% + 4,7\%$$

$$Eficiencia \% = 78,89\%$$

De lo anterior podemos definir que la eficiencia térmica de la caldera 410 es de 78,89%.

f) *Método directo:*

$$Eficiencia (\%) = \frac{m. agua \left(\frac{kg}{h}\right) (\Delta entalpia) \left(\frac{kcal}{kg}\right)}{m_{combustible} \left(\frac{kg}{h}\right) PCI \left(\frac{kcal}{kg}\right)} \times 100\%$$

$$Eficiencia (\%) = \frac{101.832 \left(\frac{kg}{h}\right) (28,54) \left(\frac{kcal}{kg}\right)}{340,56 \left(\frac{kg}{h}\right) 10.200 \left(\frac{kcal}{kg}\right)} \times 100\%$$

$$Eficiencia (\%) = 83,66 \%$$

Los cálculos realizados definieron los porcentajes de pérdidas en diferentes puntos del equipo, esto nos permite conocer de manera cuantitativa cuales son los puntos más relevantes para decidir en términos de mejoras. La figura 2-10 muestra el resumen de las pérdidas calculadas como datos de salidas de la caldera.

Outputs	<i>Perdidas en gases secos</i>	6,35%
	<i>Perdida por humedad en gases</i>	6,02%
	<i>Perdida por humedad combust.</i>	0,01%
	<i>Perdida por humedad aire</i>	0,00%
	<i>Perd.conv-rad manto</i>	4,04%
	<i>Perd.conv-rad caja humos</i>	4,70%
	<i>Perdidas por CO</i>	0,00%
	<i>Total perdidas</i>	21,11%
	<i>Rendimiento caldera PCI %</i>	78,89
	<i>Flujo masico de agua (kg/h)</i>	128.023
Datos. Gral	<i>Consumo combustible(kg/h)</i>	340
	<i>Potencia termica (kcal/h)</i>	3.200.000
	<i>Eficiencia termica (fabricante)</i>	89%
	<i>Presion maxima de trabajo</i>	7 bar

Figura 2-10. Resumen de datos de salida de las pérdidas de la caldera.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con valores calculados.

Del mismo modo que en la tabla resumen de salidas, podemos graficar (ver figura 2-11) las pérdidas para resumen de manera más esquemática los valores calculados.

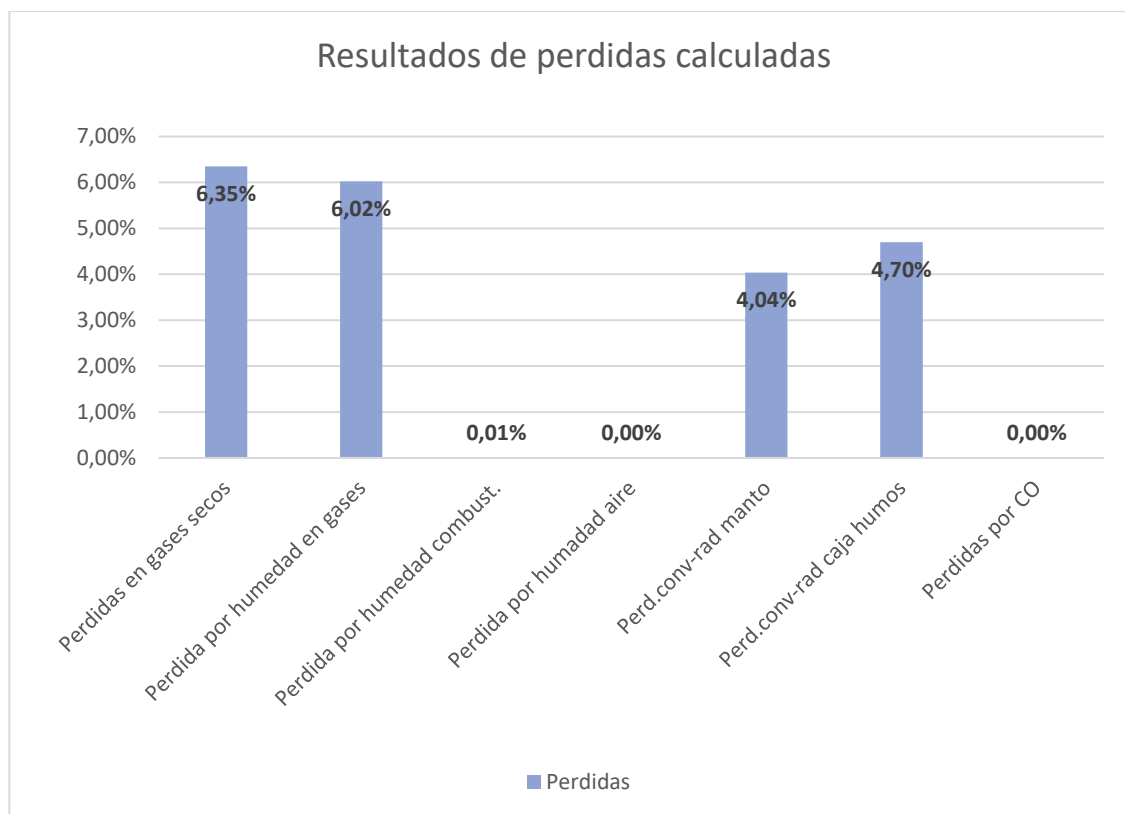


Figura 2-11. Gráfico de perdidas.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con valores calculados.

Así como se identifican las perdidas como valores esenciales para la proyección de mejoras al sistema, también debemos considerar las variables externas de la caldera, los cuales los podemos definir como la integridad mecánica del proceso: de esta manera se puede abordar este trabajo con resultados empíricos de acuerdo con inspecciones de terreno y análisis térmicos.

El siguiente Item busca complementar los calculos de eficiencia desde un punto técnico y operacional, donde se busca levantar condiciones relacionadas con la integridad operacional del sistema, las condiciones materiales y estructurales de área.

2.2 INTEGRIDAD MECANICA DEL SISTEMA DE CALEFACCION

El sistema de calefacción de la planta está compuesto por diferentes equipos y cañerías que permiten el intercambio de calor con las soluciones electrolíticas para el proceso de obtención en la nave electrowinning. Anteriormente calculamos la eficiencia térmica de la caldera, esto nos permite conocer de manera cuantitativa la cantidad de energía perdida en los diferentes medios.

El sistema se define en equipos estáticos como: intercambiadores de calor, estanques y la caldera de generación de agua caliente, siendo esta la más crítica del proceso pues es la que aporta la energía al sistema. Por otro lado, está el sistema de bombeo con sus respectivas cañerías que permiten trasladar el fluido térmico a los diferentes procesos de la planta. En este punto se busca definir las principales oportunidades de mejora en relación con la integridad mecánica del sistema. Podemos definir como integridad mecánica un proceso de donde se garantiza la adecuada fabricación, mantención y diseño de los equipos estáticos.

La integridad mecánica se basará en inspecciones visuales de ruta, los cuales se centraron en las condiciones deterioradas del sistema (cualitativo). También se utilizará termografía como instrumentos de inspección (NDT) que nos permite respaldar los cálculos medidos. De esta manera evidenciar los puntos críticos y tener información referencial para la elaboración de la propuesta en el tercer capítulo.

2.2.1 Integridad mecánica de caldera 410

Como se definió en términos de cálculos y pérdidas, la caldera de calefacción presenta diferentes puntos críticos en materias de aislación térmica, hermeticidad, contaminación y operación. De acuerdo con la figura 2-12, muestra diferentes imágenes térmicas, donde resaltan puntos de alta temperatura sobre los 150° C. Esto demuestra que existen pérdidas de aislación y revestimiento provocando un aumento de temperatura en el manto y en las cajas de humos.



Figura 2-12. Imágenes térmicas de caldera 410.

Fuente: Elaboración propia, imágenes térmicas tomadas en terreno.

Los puntos calientes se deben a pérdidas de espesores y material aislante, también se observa que la tapa de registro no posee aislación térmica alcanzando valores hasta los 220°C , contribuyendo a las pérdidas del sistema. La imagen 2-13 muestra la temperatura de la tapa de registro medida con un pirómetro y algunos puntos con daños y fuera de norma, estos detalles se consideran como subestándar, debido a la falta de integridad mecánica y lo propensas a provocar una falla.



Figura 2-13. Condiciones subestándares de la caldera.

Fuente: Elaboración propia, imágenes térmicas sacadas en terreno.

2.2.2 Integridad mecánica en tuberías y estanques

Los estanques de agua caliente y petróleo también presentan condiciones subestándares, estas condiciones son evidentes con solo inspecciones visuales de ruta, el principal defecto observable en estos equipos, son las pérdidas de aislación de las tuberías y las limpiezas de los estanques de agua caliente y combustible provocando un baja en el rendimiento de la calefacción, pues al no existir revestimientos aislantes en las cañerías conductoras del fluido, permite un intercambio más rápido con el ambiente, enfriando el fluido.

La figura 2-14 y 2-15 muestra condiciones de operación con baja integridad mecánica, en donde se observan perdidas en revestimientos y hermeticidad, estanques contaminados con el medio y el sistema de bombeo con líneas de descargas sin aislación.



Figura 2-14. Imágenes de condiciones en cuadro de bombas para impulsión de agua caliente.

Fuente: Imágenes tomadas en terreno exclusivas para trabajo de título.



Figura 2-15. Líneas de descarga agua caliente y estanque de petróleo.

Fuente: Imágenes tomadas en terreno exclusivas para trabajo de título.

Las condiciones vistas en terreno evidencian una falta en la integridad mecánica de los equipos y accesorios, pues carecen de revestimientos y aislantes, algunos tramos de cañerías que transportan agua caliente solo tienen un 10% de aislación. En las salidas del agua calientes la aislación térmica de lana mineral se aprecia quemada y con pérdidas evidentes de sus propiedades

El estanque de agua caliente presenta grietas y fugas en sus válvulas y estructuras principales, esto provoca una pérdida de energía y aumenta la probabilidad de falla total afectando el proceso y la salud de las personas.

El estanque de combustible no tiene hermeticidad y permite el ingreso de contaminantes del medio como agua y polvo, afectando drásticamente la calidad del combustible. Para concluir las condiciones de integridad mecánica en operación del sistema de calefacción, la figura 2-16 muestra una tabla donde se definen los equipos con sus principales mecanismos de falla y modos de fallas.

EQUIPO	MODOS DE FALLA	MECANISMOS DE FALLA
 Caldera 410	Puntos calientes en superficies aisladas, principalmente en la caja de humos y superficies del manto.	Deterioro de espesor o pérdidas de propiedades de los revestimientos en mantos y las cajas.
	Aumento significativo de vibraciones en sistema de aspiración de aire.	Variaciones en la velocidad de giro del soplador y soldaduras mecánicas.
 PIPING DEL SISTEMA	Fugas en diferentes puntos de las cañerías, uniones y válvulas.	Desgaste en cañerías por incrustaciones de magnesio calcio, estas son abrasivas y provocan grietas y pérdidas de espesor.
	Bombas centrífugas con cavitación y exceso de incrustaciones de magnesio-calcio en sellos mecánicos y voluta.	Diferencias de presiones desde estanque de agua, configuraciones de la línea. Al no tener reducciones excéntricas en succión provoca la acumulación de sedimentos.
 ESTANQUE DE FLUIDOS	Superficies con alta temperatura.	Perdida de propiedades de aislación, lana de vidrio quemadas.
	Micro fugas en base de estanque.	Base con pérdidas de material hermético, desgaste de suelo.
	Fugas en uniones mecánicas.	Diseño no considera dilatación y contracción de las temperaturas ambientales (día y noche).

Figura 2-16. Tabla resumen de integridad mecánica operacional en el sistema de calefacción.

Fuente: Elaboración exclusiva según visita a terreno, planta óxidos.

El presente capítulo tuvo como finalidad entregar mediante calculos y evaluaciones en terreno, las causas que habilitan las perdidas de eficiencia en el sistema de calefacción de la planta y como estas se manifiestan: en los calculos mediante porcentajes en diferentes perdidas de calor y en el levantamiento de la integridad mecánica del sistema donde se conocieron las condiciones de operación y el deterioro preocupante de algunos mecanismos de mucha importancia para la seguridad y continuidad operacional.

El siguiente objetivo tendrá la finalidad de integrar los temas vistos en los capítulos uno y dos, junto con el desarrollo de la propuesta, el siguiente capítulo busca definir una evaluación de costos en relación con el beneficio que se obtiene al implementar las actividades de mejora. De este modo podemos señalar que el capítulo 3 es representado en base a lo trabajado hasta este punto. La figura 2-17 muestra un esquema general de trabajo en base al desarrollo de la propuesta, se destacan los puntos relevantes y finalidad de cada capítulo.

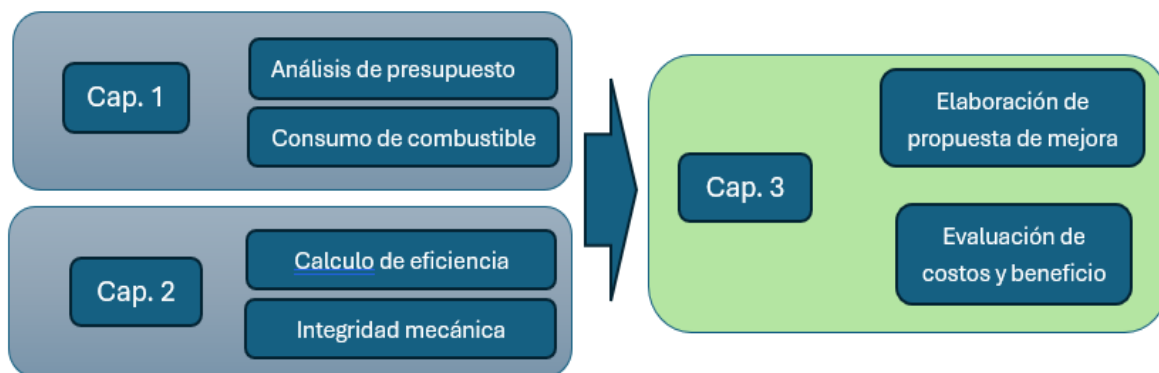


Figura 2-17. Esquema general de trabajo, coherencia de capítulos en función del objetivo

Fuente: Elaboración Exclusiva para trabajo de título.

**CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA Y CONSIDERACIONES TECNICO -
ECONOMICAS.**

3.1 PROPUESTA DE MEJORA

Ya definidos los puntos mas relevantes de la eficiencia térmica en la planta junto con las otras variables cuantitativa vistos en los capítulos anteriores podemos definir una propuesta de mejora que encierre los lineamientos de mantenimiento y operación en mediano y corto plazo.

Esta propuesta busca plantear un modelo referencial para mejorar la eficiencia térmica de la caldera 410 y de la calefacción de la planta en general, buscando aumentar su rendimiento con modificaciones en el mantenimiento y operación.

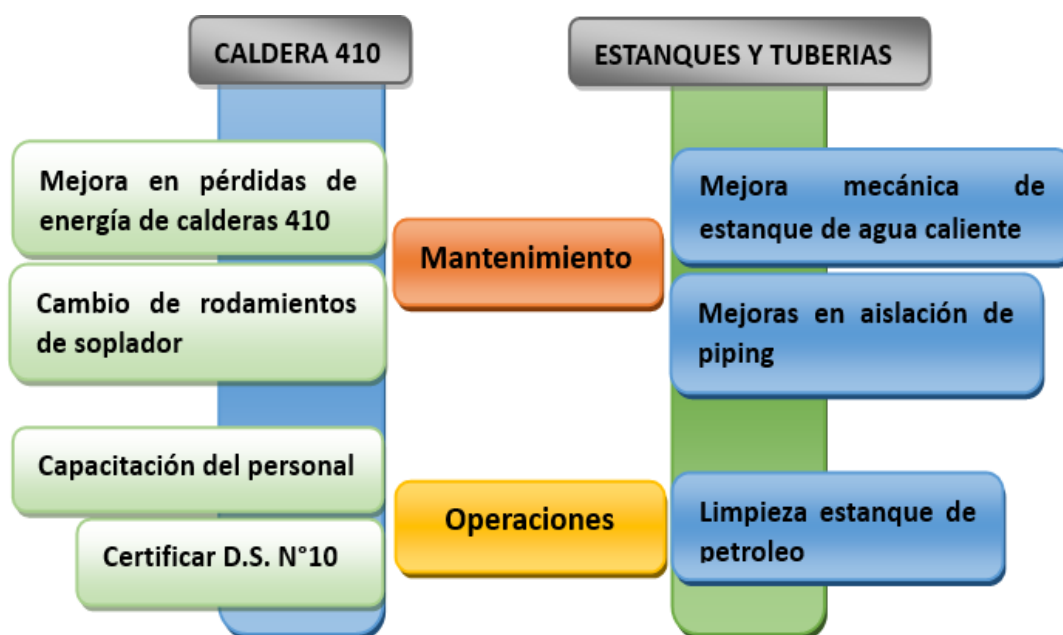


Figura 3-1. Esquema resumen de propuestas de mejora.

Fuente: Elaboración exclusiva según visita a terreno, planta óxidos.

La propuesta se basa en dos ejes principales para el modelamiento e implementación de mejora: caldera de calefacción 410 y sistemas de estanque y tuberías. Estos serán definidos respectivamente en los siguientes ítems, cada eje tendrá las actividades a realizar conforme al área respectiva de su desarrollo, estos puntos de mejora serán tomados por mantenimiento y operaciones. El mantenimiento contempla actividades

de mediano y corto plazo que debe realizar el personal de ingeniería de mantenimiento, esta unidad debe asignar y programar la detención para la ejecución de las actividades.

Por parte de operación, los encargados de llevar a cabo estas mejoras serán los jefes de operaciones, quienes se encargarán de capacitar y certificar los equipos involucrados como se muestra en la figura 3-1.

3.1.1 Mejoras en Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento existentes en la operación de la caldera 410 carecen de integridad preventiva y solo se basan en síntomas visuales como fugas, ruidos y vibraciones. Las actividades en la caldera se programan semanalmente con un tiempo de intervención de 6 a 8 horas, sin embargo, estas estrategias preventivas no han logrado disminuir el consumo energético.

La figura 3-2 muestra las actividades existentes en las mantenciones preventivas de la caldera 410, donde se designan tiempos excesivos para evaluaciones visuales y limpiezas superficiales de la caldera por parte del personal mecánico. Por otra parte, las mantenciones del personal eléctrico si representan mayor integridad en su ejecución, pues contemplan limpieza de componentes electrónicos y desarme del quemador para limpiezas internas lo cual ayuda en la correcta combustión del equipo.

ACTIVIDADES PROGRAMADAS CALDERA 410								
OT	Especialidad	SEMANA	ACTIVIDADES	N°	Duración	HH	inicio	term.
2000234	Mecanico	2	Reapriete sistema de lubricacion y termografia	2	8	16	9:00	
2000237	Electrico	2	Limpieza de quemador y logica de control	2	8	16	10:00	
2000456	MONCON	2	Severidad vibratoria soplador	2	1	2	14:00	
2000543	Mecanico	3	Inseccion de caldera, mantencion general	2	8	16	9:00	
2000638	Electrico	3	Limpieza de quemador y logica de control	2	8	16	10:00	

Figura 3-2. Modelo de programación de actividades semanales en caldera 410.

Fuente: Elaboración exclusiva según visita a terreno, planta óxidos.

En relación con el modelo de programación existente en la empresa, no se contemplan proyectos de mejora a mediano plazo lo que perpetua el deterioro del equipo y del sistema completo, no logrando mejorar la confiabilidad del equipo ni controlar los mecanismos de falla latentes evaluados en el segundo capítulo. Podemos definir el programa actual como deficiente en la ejecución de las actividades y sin integridad en sus operaciones, pues solo encasilla actividades de bajo impacto en la mejor de equipo y carece de variaciones específicas.

Por otra parte, se utilizan recursos e indisponibilidad del equipo sin logrando ninguna mejora, es decir el equipo se detiene sin conseguir mejoras productivas en relación con sus principales problemas. El modelo de propuesta que se definirá a continuación busca plantear mejoras enfocadas a la unidad mantenimiento. Esta propuesta se basará principalmente en lo diagnosticado en la unidad anterior, en donde se evidenciaban desviaciones en la integridad mecánica y los problemas de eficiencia térmica que afectaban de diferente manera la eficiencia del sistema de calefacción.

El cuadro de la figura 3-3 define la propuesta de mejora por parte de la unidad de mantenimiento, el cual considera las actividades a desarrollar en la caldera 410 y los estanques y tuberías del sistema, Estos se deben llevar a cabo en función al aumento de eficiencia y mejora de la integridad mecánica del sistema de calefacción.

La figura define las actividades que deben ser desarrollas por el equipo de mantenimiento. Las propuestas definidas están basadas en los puntos débiles del sistema de calefacción y cuales representan ciertas amenazas como las pérdidas de energía en el sistema de calefacción o los defectos de la integridad mecánica en relación con los daños y deterioros de aislación térmica.

Este punto solo definirá la propuesta de mejora y la descripción de sus actividades, las consideraciones económicas y factibilidad del trabajo serán desarrolladas en la segunda parte de esta unidad, logrando de esta manera una evaluación pertinente de cada punto de mejora explicado en este ítem.

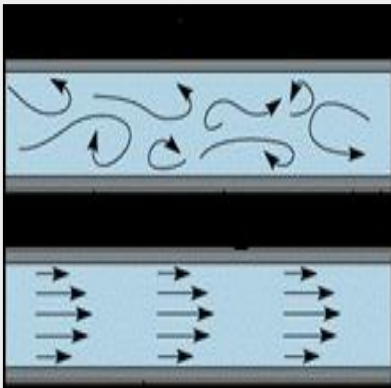
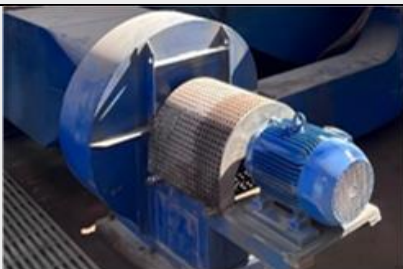
PROPUESTA DE MEJORA	ACTIVIDAD	EQUIPO	IMAGEN REFERENCIAL
Mejoras en pérdidas de energías	Perdidas por gases secos: <i>Instalación de turbuladores, Calibración de quemador, Limpieza de incrustaciones calcio-magnesio.</i>	CALDERA 410 (Babcock)	
	Perdidas por Conv/Rad: <i>Instalación de mantas térmicas, Mejora de concreto refractario, Cierre perimetral.</i>		
Mejora mecánica en soplador	<i>Por el aumento de vibraciones se deben cambiar rodamientos y rodete en soplador. Debe realizarse en detención programada.</i>	CALDERA 410 (Babcock)	
Mejora mecánica de estanque de agua caliente	<i>Se debe reparar manto de estanque para evitar fugas o rupturas catastróficas, además de cambiar revestimiento de aislación.</i>	TUBERIAS Y ESTANQUES	
Cambio de aislación térmica en piping	<i>Se debe cambiar lana mineral de aislación térmica en ductos del sistema de calefacción. Tomar como referencia norma UNE-EN ISO 12241:2008.</i>	TUBERIAS Y ESTANQUES	

Figura 3-3. Cuadro de propuestas de mejora en mantenimiento.

Fuente: Elaboración exclusiva según visita a terreno, planta óxido.

El cuadro anterior definió las actividades de la propuesta de mejora en la unidad de mantenimiento. Las cuatro propuestas definidas, representan los puntos mas importantes para atender en la unidad de mantenimiento. Cada propuesta de mejora establece actividades relacionadas con sus mecanismos y problemas.

La actividad de mejora mecánica en el estanque de agua caliente mejorara la contención del fluido térmico y sus perdidas de calor que actualmente existen, esta actividad debe ser ejecutada por el personal mecánica en un mediano plazo, pues esta actividad requiere una planificación que coincida con detenciones del sistema, además del estudio respectivos en calidad de repuestos y horas de personal asignado, ya que al existir desviaciones o retrasos en la programación, podría afectar considerablemente la producción.

Las mejoras propuestas para disminuir las pérdidas de energías por contaminantes en los tubos de gases se programarán en dos actividades, estas serán plazos trimestrales y semestrales: la actividad de limpieza en lado gases, buscara disminuir la acumulación de hollín en la superficie de los tubos, puesto que el hollín disminuye el rendimiento y en algunos casos provoca rupturas en los mecanismos. Esta actividad debe ser realizada en periodos trimestrales para evitar desgastes o acumulación excesiva.

Continuando con las actividades en materias de perdida de energía por contaminantes el cuadro definió la actividad de limpieza de lodos y incrustaciones de magnesio calcio. Esta actividad permite eliminar contaminantes excesivos en el lado agua, su ejecución deber ser es periodos semestrales y la programación debe contemplar tiempos de enfriamientos de la caldera. La limpieza de estos puntos beneficia la trasferencia de calor.

Para terminar con las propuestas en mantenimiento, se recomienda el cambio de rodamientos, soportes y rodete de soplador de caldera 410, pues según lo concluido en terreno este ha presentado un aumento de las vibraciones del conjunto por daños en pistas del rodamiento y desbalanceo del rodete. Esto programado a corto plazo.

3.1.2 Mejoras en Operación

El personal de operación tiene severas deficiencias en materias de desarrollo en la puesta en servicio de la planta y en más detalle, del sistema de calefacción. Esto ha sido perjudicial para el proceso en general, pues al no contar con procedimientos de trabajos reglados y certificados, no se logra cumplir con un estándar adecuado para operar y cuidar los equipos en proceso.

El principal defecto en la operación del sistema de calefacción es el bajo conocimiento de los equipos por parte del personal de operación. Esto ha significado un daño sistemático al proceso y sus equipos, pues el carecer de conocimiento en materias de servicio, operación y mantenimiento aumenta la posibilidad de presentar fallas catastróficas en calefacción. Como propuesta se define la necesidad de contar con certificación y capacitación por el decreto supremo N° 10 del ministerio de salud, pues este decreto establece, regulariza y aprueba el reglamento de calderas y autoclaves que utilizan vapor de agua, esto permitirá a la unidad contar con un registro legal de sus mantenciones y el consumo mensual de agua, además de cumplir con las exigencias mínimas de PH del agua, cual debe tener un potencial de hidrogeno en un rango 10,5 a 11,5 con 0% de dureza. Para obtener la certificación por parte de la autoridad sanitaria, se realizan una serie de pruebas técnicas en materias de fluidos, presiones, emisiones y conocimientos de operación. Además de lo anterior la norma señala el uso de una bitácora o libro foliado de operación diaria, donde se deja registro de todas las mantenciones, accidentes, consumos y emisiones registradas.

Otra consideración de mejora que se mencionó anteriormente es la capacitación del personal, pues actualmente ningún operador cuenta con una certificación ni curso asociado a la operación de calderas. Se debe considerar estrictamente en la mejora como medida a corto plazo pues, ante situaciones de emergencia el personal debe saber como actuar y que acciones tomar para prevenir eventos no deseados en la operación de la caldera y su entorno. Además, el personal debe saber como operar de manera integra la caldera, conocer las variables de temperatura, presión y definir tiempo de limpieza y drenado para botar impurezas post operación. De esta manera se mejora la calidad de operación y disminuyen

la probabilidad de fallas o deterioros en el equipo. La última mejora definida para la unidad de operaciones: es la limpieza semestral de estanque de combustible, esta mejora busca resolver los problemas de limpieza en el quemador y la calidad del combustible, pues al existir un deposito altamente contaminado, perjudica de manera acelerada la calidad de la combustión y al mismo tiempo la eficiencia en la calefacción. La figura 3-4 muestra las propuestas previamente definidas con sus respectivos plazos de ejecución.

PROPUESTA DE MEJORA	ACTIVIDAD	EQUIPO	IMAGEN REFERENCIAL
Limpieza de estanque de combustible	<i>La limpieza semestral del estanque de combustible busca eliminar la contaminación acumulada en el quemador y la base del estanque. Esta actividad debe ser programada de manera semestral y su extensión en mejoras de barreras de drenaje para combustible.</i>	TUBERIAS Y ESTANQUES	
Capacitación del personal en operaciones de caldera	<i>Capacitación del personal en corto plazo, aumenta la calidad de operación y el cuidado del equipo.</i>	CALDERA 410 (Babcock)	
Certificar D.S N° 10	<i>El decreto supremo permite operar bajo condiciones regladas y seguras, donde existan registro de mantenciones, operaciones y consumo de combustible.</i>	CALDERA 410 (Babcock)	

Figura 3-4. Cuadro de propuesta de mejora para unidad de operaciones planta SX.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

3.2 CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS

Este punto se centrará en las consideraciones económicas de las propuestas, buscará resaltar de manera cuantitativa las ventajas de aplicar los modelos de mejora presentados y al mismo tiempo un enfoque de factibilidad en relación con el costo-beneficio.

Para establecer los resultados en relación con el beneficio de implementar las propuestas, se debe conocer los márgenes porcentuales que se logra en cada condición de mejora, de esta manera se estima en términos monetarios el beneficio proyectado en relación con el costo de implementación de las propuestas.

Los cálculos de estimación se basarán en las diferentes pérdidas de energía de la caldera 410 vistas en el capítulo dos y los porcentajes estimados se desarrollarán en base a referencias teóricas de otros trabajos en donde, según tablas y gráficos se pueden estimar los porcentajes de incremento en la eficiencia térmica de la caldera.

En relación con la eficiencia de las tuberías y aislaciones, vistas en el ítem de integridad mecánica, estas serán estimadas de acuerdo con referencias bibliográficas que definan mejoras en rendimiento en función de las actividades de mejora propuesta, ya que es fundamental conocer el beneficio de las mejoras en función al costo de implementación y el gasto actual en consumos de combustible.

Los puntos que se desarrollarán a continuación definirán la proyección de beneficio de las pérdidas estudiadas y el gasto estimado para cada actividad. También se explicará de manera técnica las actividades de mejoras, obteniendo un presupuesto estimado de estas y su mejora porcentual en materias de eficiencia.

3.2.1 Pérdidas de energías en gases secos

Las pérdidas en gases secos fueron calculadas en el segundo capítulo; indica la energía que se escapa hacia la chimenea mediante los gases secos, es decir energía que no se aprovecha en el sistema de intercambio de la caldera y se considera pérdida. Esto ocurre

por diferentes motivos: principalmente es debido a la velocidad de los gases en la cámara, esto provoca que la energía producida no logre intercambiarse por completo entre las paredes de los tubos y gran parte de los gases se vaya directamente en la chimenea.

La figura 3-5 muestra el comportamiento de los gases en las cámaras de combustión y como se comporta el calor en relación con su dirección y velocidad. Se nota que en la parte central del fluido se concentra más calor que en las periferias, esta concentración es inherente al diseño de los tubos y el hogar, no permitiendo un intercambio más homogéneo.

Por otra parte, la figura 3-6 representa un grafico donde se relaciona la eficiencia de la caldera con la temperatura en chimenea ($^{\circ}\text{C}$), podemos notar que al aumentar la temperatura el sistema es menos eficiente debido a que los gases secos liberados no son aprovechados para la calefacción. Estos valores permiten estimar el incremento porcentual que se obtiene disminuyendo las temperaturas de salida con las mejoras propuestas.

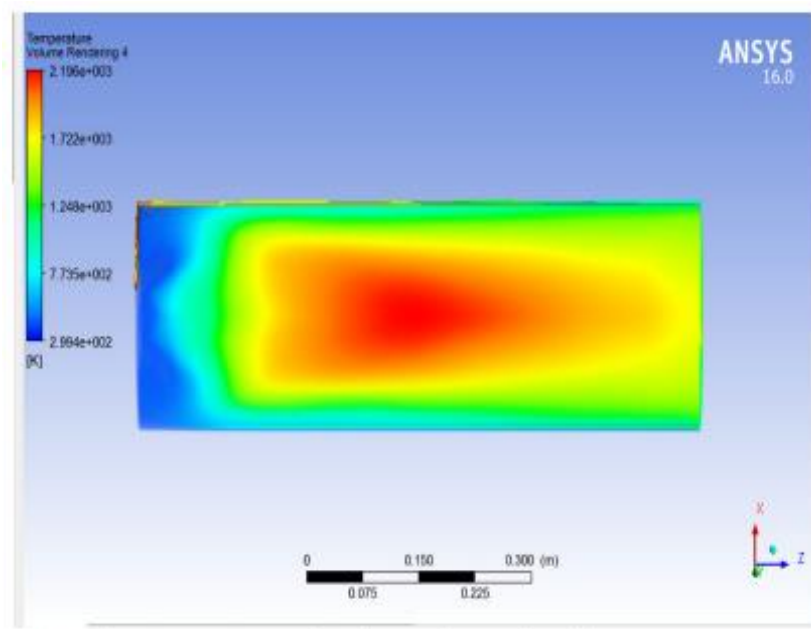


Figura 3-5. Comportamiento térmico gases en cámara de combustión caldera pirotubular.

Fuente: Scientia et Technica Año XXII, Vol. 22, No. 4, diciembre de 2017. Universidad Tecnológica de Pereira.

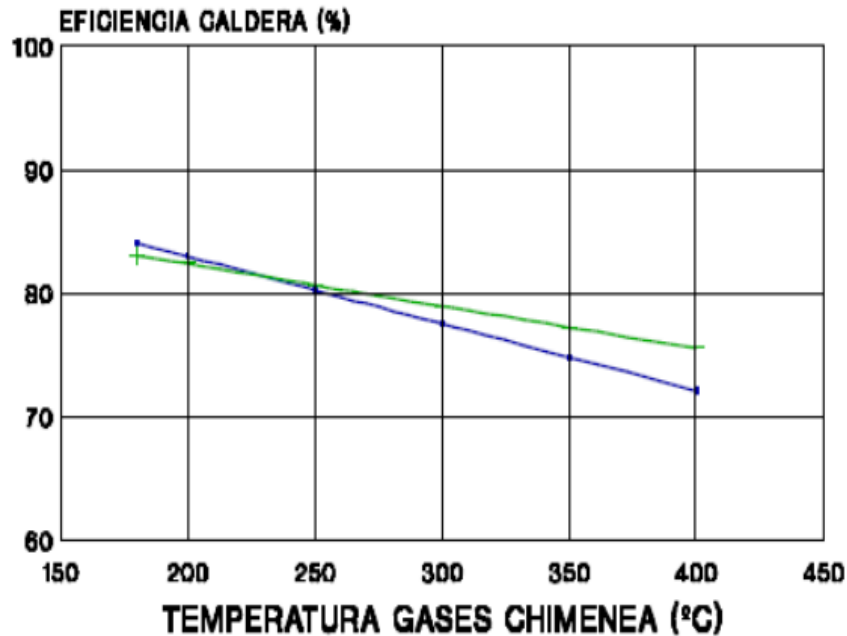


Figura 3-6. Eficiencia vs Temperatura en chimenea.

Fuente: THERMAL ENGINEERING LTDA.

Las actividades del plan de mejora que tienen por objetivo disminuir las pérdidas por gases secos tiene diferentes responsables en su programación:

La actividad de calibración del quemador esta asignada para el personal de mantenimiento eléctrico, además de un especialista representante de la marca, quien dirija la actividad. Como lo mencionábamos anteriormente esta actividad, la calibración optima del quemador en relación con su exceso de aire y combustión. Tomando como referencia la potencia térmica máxima (3.200.000 kcal/h), bajando las temperaturas y evitando la generación de gases de combustión en la chimenea sobre los 180°C. el aumento de eficiencia esperada: 1,5 % a 2%.

La instalación de turbuladores mejorara el intercambio de calor en la caldera además de disminuir la velocidad de los gases por su diseño helicoidal. Las turbulencias producidas en los gases es la mayor ventaja de estos dispositivos, pues esta reacción en los gases obliga el intercambio con el medio. La figura 3-7 muestra la trayectoria de los gases de combustión al pasar por los turbuladores. Los gases son mezclados de forma mas uniforme y permiten obtener mejor intercambio de calor.

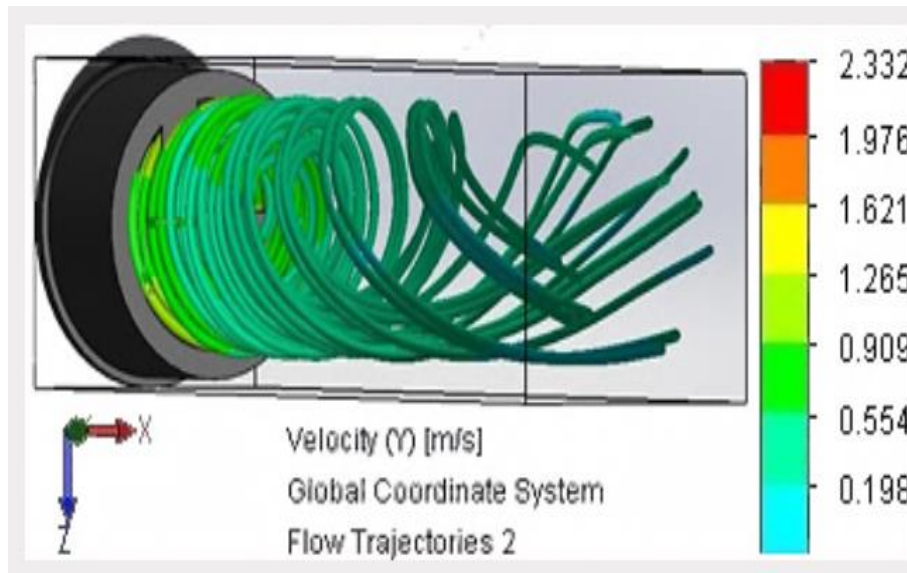


Figura 3-7. Trayectoria de gases de combustión en turbuladores.

Fuente: Metodología para el cálculo del desempeño térmico de turbuladores helicoidales en calderas de vapor: modelo matemático y simulación. Universidad Tecnológica de Pereira.

Aunque el incremento de eficiencia es variado en la implementación de estos mecanismos debido a la contrapresión que puede existir en el quemador, algunas referencias bibliográficas señalan que manteniendo una contrapresión adecuada y sin disminuir la temperatura por bajo el punto de rocío (160 °C aprox.) se puede obtener un incremento de hasta 1,5% de eficiencia total en el equipo.

Otra actividad que se considera en las pérdidas de energías por gases secos es la limpieza de incrustaciones magnesio-calcio y limpieza de hollín, esta actividad contribuye en mejorar el intercambio de calor de los medios de la caldera, y permite evitar el daño de los mecanismos internos por minerales corrosivos o de desgaste.

Estas actividades deben ser periódicas para asegurar un correcto funcionamiento del equipo, es decir la programación debe incluir estos trabajos al menos 4 veces al año y disponer de todos los materiales respectivos para dichas limpiezas.

Las figuras 3-8 y 3-9 muestran la grafica de eficiencia en relación con el aumento de incrustaciones y hollín respectivamente, se observa fácilmente que, al aumentar el espesor

de estos contaminantes se reduce la eficiencia del equipo, debido al bajo intercambio que este genera.

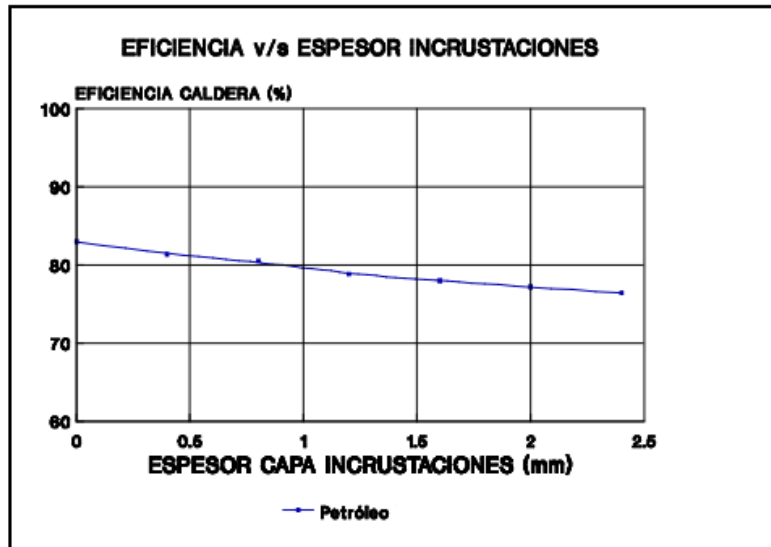


Figura 3-8. Eficiencia v/s incrustaciones.

Fuente: Artículo técnico, THERMAL ENGINEERING.

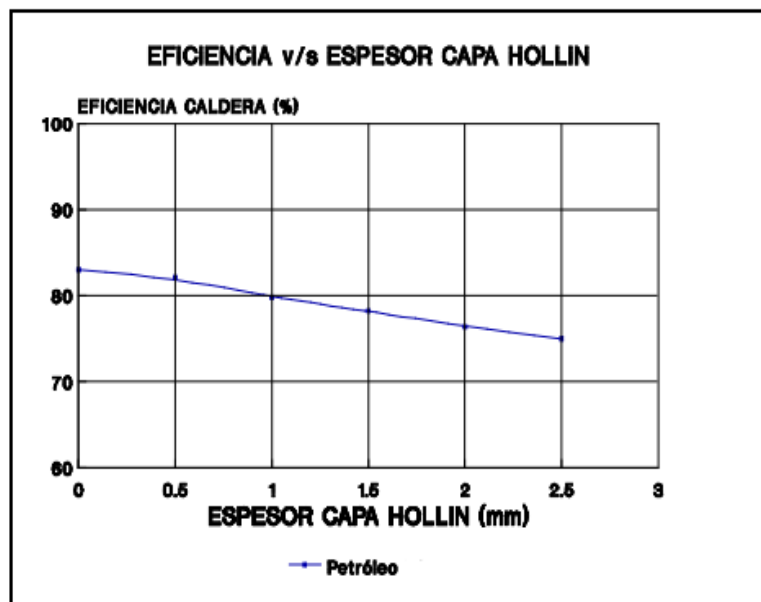


Figura 3-9. Eficiencia v/s Capa de hollín.

Fuente: Artículo técnico, THERMAL ENGINEERING.

Ya definiendo los incrementos en la eficiencia de cada actividad señalada para las pérdidas de gases secos, podemos generar un presupuesto estimado en relación con los costos fijos y directos que representa cada mejora señalada. Teniendo en consideración que los costos directos se traducen en aquellos costos inherentes a la actividad en materias de repuestos, transportes o materiales, los costos directos que se muestran en la figura 3-10 son estimados por información de mercado y cotizaciones proporcionadas por parte de la empresa. De igual manera se estiman las horas hombre (HH) que precisa cada actividad junto con el costo unitario por hora, este valor dependerá de la actividad y se define de acuerdo con el valor de mercado.

Finalmente se muestran los costos totales de la implementación en las actividades, junto con los porcentajes estimados en aumento de eficiencia del equipo. Conocer los porcentajes de aumento en eficiencia nos permitirá definir la viabilidad de las propuestas más adelante de este capítulo.

Perdidas por gases secos	Actividad	Costos Direc. (USD)	HH	Costo HH (USD)	Total, USD	Aumento eficiencia %
	<i>Limpieza de incrustaciones mag-calcio y hollín</i>	\$1.200	10	\$30	\$1.500	1,00%
	<i>Instalación Turbuladores</i>	\$2.600	64	\$30	\$4.520	2%
	<i>Calibración de quemador</i>	\$200	10	\$70	\$900	1,25%
Total					\$6.920	4,25%

Figura 3-10. Presupuesto de mejora para pérdidas de gases secos.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

3.2.2 Pérdidas de energías por convección y radiación

Las pérdidas por radiación presentes en la caldera estudiada ocurren principalmente por disminuciones de aislación por motivos físicos o químicos: la aislación de lana mineral de 100 mm de espesor y con densidad de 80 kg/3 permite separar los medios térmicos del exterior con el interior del sistema. El deterioro paulatino de este material aislante es debido a la prolongada exposición a la humedad y cambio bruscos de temperatura provocando la

disminución de sus propiedades y en ciertas ocasiones teniendo efectos adversos en el proceso. La radiación emitida desde la caldera busca el medio más fácil para poder transferir energía, de este modo, si no existe un medio aislante integro, el calor emitido se pierde por las paredes del manto.

Una opción viable para el reemplazo de lana mineral dañada o con pérdidas considerables de aislación es la incorporación de mantas térmicas, estas reducen el tiempo de detención del equipo y su diseño es sencillo para desmontar y montar. A diferencia de reemplazar la lana mineral esto no sería favorable a los tiempos de detención pues significaría una detención prolongada del sistema y el manto no representa un diseño amigable para el cambio de lana. Por otra parte, también existen perdidas por convección, las cuales se centran en los medios de refracción al interior de la caldera. Los ladrillos refractarios en simples palabras permiten retener el calor, esto debido a sus propiedades de alúmina y sílice.

Los problemas de convección ocurren por el deterioro de los ladrillos refractarios provocando un aumento de la temperatura en las cajas de humos. De esta manera el calor que debería recircular por la reacción de los ladrillos se trasfiere por convección al medio exterior.

La figura 3-11, muestra el deterioro del concreto refractario en la caja de humos del Equipo, se observa una gran cantidad de concreto despedazado en la parte inferior, este punto es de alto riesgo y un foco relevante en pérdidas de calor. En relación con lo mencionado anteriormente y de acuerdo con la información termográfica captada en terreno, la parte mostrada en la figura representa el punto con mayor temperatura de la caldera 410, llegando a alcanzar los 250°C, esto se explica por el notable deterioro señalado y la falta de recubrimiento refractario en la tapa de registro del equipo, esta tapa al igual que muchos componentes sin revestimiento, tienden a acumular mucho calor durante la operación, significando perdidas, incluso puntos de riesgo de quemaduras hacia el personal.



Figura 3-11. Concreto refractario dañado en la caja de humos. Calentador babcock.

Fuente: Registro fotográfico de caja de humos.pl sx.

Si precisamos las mejoras a realizar las actividades son tres: primero la mejora de la aislación de los mantos, es decir la instalación por radiación con montajes de mantas térmicas esto disminuye el intercambio de calor con el medio como se había explicado anteriormente.

Otra actividad es la mejora o reconstrucción del concreto refractario al interior de la caja de humos, permitiendo la refracción del calor y disminuyendo la convección, esta actividad se precisa según información de mercado, los costos establecidos son estimados.

La tercera y ultima actividad de este ítem es la implementación de un galpón (cierre perimetral) para la caldera de agua, pues este, al encontrarse a intemperie esta expuesto a perdidas de calor por el ambiente directo o por el viento, además que los cambios bruscos de temperatura perjudican estructuralmente al equipo y ciertamente la eficiencia de este. Un cierre perimetral que proteja el equipo de factores ambientales beneficiara un incremento de hasta un 0,75% en eficiencia. Las mejoras propuestas y analizadas se expresarán en términos económicos en la figura 3-12.

Perdidas por convección y radiación	Actividad	Costos Direc. (USD)	HH	Costo HH (USD)	Total, USD	Aumento eficiencia %
	Instalación de mantas térmicas	\$4.500	32	\$40	\$5.780	1,50%
	Mejora de concreto refractario	\$1.000	30	\$45	\$2.350	1,00%
	Cierre perimetral	\$7.200	140	\$30	\$11.400	1,00%
Total					\$19.530	3,50%

Figura 3-12. Presupuesto para mejora en perdidas por convección y radiación.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

3.2.3 Cambio de rodete y rodamientos en soplador

Los mecanismos del soplador de la caldera deben ser íntegros en su operación y eficiencia, es por eso que, durante la inspección de terreno realizada, se observo un deterioro acelerado en los rodamientos del soplador y un desgaste excéntrico del rodete, si bien esto lo señalamos en el capítulo dos, es importante destacar esta actividad como una mejora en la integridad mecánica de la caldera y del sistema de calefacción en general, pues una falla inesperada podría afectar al proceso y la proyección catódica.

La falla en los rodamientos y el rodete ha provocado vibraciones de alto riesgo, estas pueden ocasionar aumentos de temperaturas hasta fallas catastróficas del conjunto. Una falla catastrófica en la unidad del soplador significaría muchas horas de perdidas, pues al bajo rendimiento de las mantenciones preventivas, también se suma la baja catalogación de los repuestos críticos, es decir si un componente falla, no se contaría con el repuesto a tiempo.

La figura 3-13 muestra la tendencia de severidad vibratoria registrada por los equipos MONCON, en la figura se observan dos variables importantes: velocidad, la cual registra frecuencias de baja velocidad y permite determinar condiciones de falla en desalineamiento, desbalanceo o solturas mecánicas. Las herramientas de aceleración, nos

permite detectar mecanismos de fallas en frecuencias altas, es decir por sobre los 1000 Hz, estas fallas pueden relacionarse con las frecuencias de falla en los rodamientos.



Figura 3-13. Tendencias de vibraciones en soplador de calentador 410.

Fuente: Registros de PULSE SKF. Mantenición óxidos, mantos blancos.

En la figura se aprecian los valores registrados en diferentes periodos, entre estos, se observa una disminución en los valores de velocidad, pero un aumento en la aceleración, esto se explica por los alineamientos del conjunto que intentan mejorar los valores alarmantes que muestra la figura, el alineamiento no logra disminuir las vibraciones de alta frecuencia (que provienen de los rodamientos) porque no es la causa raíz del problema sino un síntoma de los mecanismos del soplador (rodete y rodamientos).

Las actividades para mejorar las condiciones mecánicas y operacionales del soplador son dos: cambio de rodamientos y descansos en soplador, luego de la instalación el equipo debe ser alineado. La otra actividad es el cambio de rodete, este componente debe ser cambiado por uno nuevo que cumpla las mismas características de diseño, además se debe verificar balanceo en postura y registrar las desviaciones, esto permitirá como puntos referencias para el personal mecánico al momento de balancear el componente.

La figura 3-14 muestra los presupuestos estimados para la mejora mecánica en el soplador de la caldera 410, estas actividades se consideran como criticas debido a las alarmas sintomáticas mostradas anteriormente.

Mejora mecánica en soplador	<i>Actividad</i>	<i>Costos</i>	<i>HH</i>	<i>Costo HH</i>	<i>Total,</i>	<i>Aumento</i>
		<i>Direc. (USD)</i>		<i>(USD)</i>	<i>USD</i>	<i>eficiencia</i>
						<i>%</i>
	<i>Cambio y balanceo de rodete</i>	\$600	4	\$40	\$760	
	<i>Cambio de rodamientos y descansos</i>	\$1.500	6	\$30	\$1.680	
Total					\$2.440	0,50%

Figura 3-14. Presupuesto para mejora en soplador.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

3.2.4 Mejora mecánica en estanque de agua caliente

El estanque de agua caliente cumple un rol imprescindible en la conservación del fluido térmico, pues se representa con un termo contenedor en el proceso, este debe mantener la temperatura del fluido que retorna hacia la caldera, es por eso que la reparación mecánica estructural debe buscar la hermeticidad integra para evitar que el agua de retorno pierda calor.

El estanque de agua caliente está diseñado con acero y revestimientos de lana mineral, para contener la lana se utiliza acero inoxidable remachado, actualmente el revestimiento de inoxidable presenta rupturas que permiten el ingreso de humedad y contaminantes solidos hacia el aislante de lana mineral, esto provoca el deterioro acelerado del revestimiento térmico.

La actividad propuesta es mejorar el revestimiento remachado para evitar deterioro del revestimiento térmico (lana mineral), para esto se define un presupuesto estimado para la actividad de mejora. Esto es beneficioso en la integridad mecánica del sistema de calefacción. Si bien no es posible calcular ni estimar el aumento de eficiencia que tendrá esta mejora, de igual manera es necesaria su ejecución pues permite evitar fallas potenciales

en el estanque. La figura 3-15 representa el presupuesto de la actividad tomando en consideración los costos directos y mano de obra.

Mejora mecánica TK de agua caliente	Actividad	Costos Direc. (USD)	HH	Costo HH (USD)	Total, USD	Aumento eficiencia %
	Reparación y cambios de revestimiento inox.	\$500	12	\$30	\$860	...
Total					\$860	...

Figura 3-15. Presupuesto estimado para reparación mecánica en estanque de agua caliente.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título.

3.2.5 Cambio de aislación térmica en piping

De acuerdo al desarrollo de este trabajo, y los levantamientos en terreno podemos afirmar que la red de tuberías es el mas deteriorado del sistema de calefacción, esto se debe principalmente al daño sistemático en su aislación térmica, pues hay tramos de larga extensión que no poseen aislación térmica y sus diseños son variados en sección y material, es decir existen tuberías de fibra, HDPE y acero repartidas en un mismo tramo y sin aislación térmica que evite el intercambio de calor acelerado.

La norma UNE-EN 12241 proporciona métodos de calculo y diseño que se recomienda en instalaciones de aislación térmica industrial, esta norma sirve de referencia técnica para abordar los asuntos críticos en aislación de la planta. Se debe comprender la importancia de la integridad en aislación del sistema de tuberías pues, se han observado perdidas de lana mineral principalmente por contaminación en ambientes expuestos, esto ha provocado la perdida de propiedades en el aislante térmico, incluso en algún caso ha llegado a acelerar el intercambio en los puentes térmicos.

La siguiente figura muestra la red de tuberías que no precisan ningún tipo de aislación, la cual corresponde aproximadamente a un 45% del total. En la figura 3-16, las líneas de color rojo señalan las líneas que cumplen con aislación térmica en buenas condiciones, por otro lado, las líneas de color azul representan aquellas líneas que no poseen ningún tipo de aislación en el sistema.

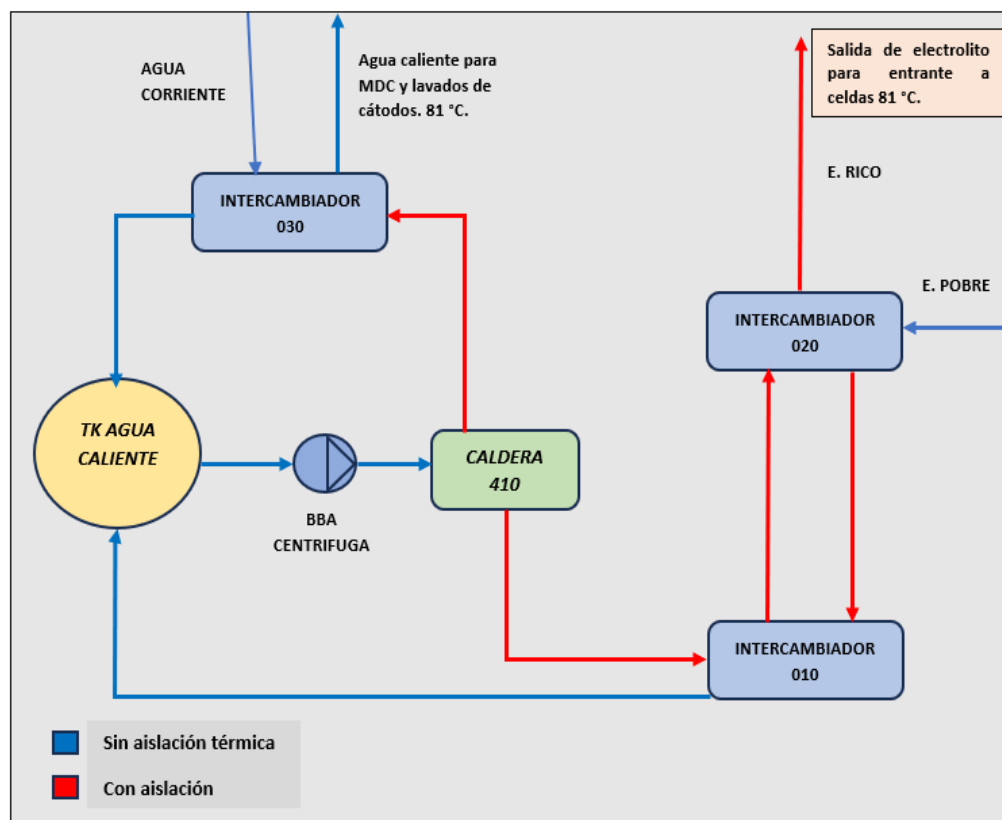


Figura 3-16. Red de tuberías con aislación térmica.

Fuente: Elaboración de acuerdo con sistema de calefacción de planta SX-EW, MB.

Como hemos mostrado en la figura, existe un gran número de tuberías sin aislación térmica. Esto afecta significativamente el proceso y demanda más temperatura a la caldera, para solucionar este problema se debe realizar el montaje de aislación térmica a los ductos sin aislación. Según lo evaluado en terreno, los tramos sin aislación suman aproximadamente 165 metros en total, además existen tres diferentes diámetros en la red que deben ser considerados en el presupuesto de esta actividad.

La figura 3-17 muestra el presupuesto estimado para las reparaciones en aislación térmica del sistema de la planta, considerando los diferentes tramos y sus dimensiones, estas reparaciones serán realizadas por el personal de mantenimiento mecánico, pues la mejora será la instalación de mantas térmicas tubulares que disminuyan los puentes térmicos no deseados en las instalaciones, esto debido a que las aislaciones de lana mineral estacionarias tienen un costo mas elevado y precisas de mayores recursos de gestión.

Mejora de aislación térmica en piping	Actividad	Costos Direc. (USD)	HH	Costo HH (USD)	Total, USD	Aumento eficiencia %
	<i>Tramo línea: 100 [m]. DN:8"</i>	\$2.700	60	\$30	\$4.500	...
	<i>Tramo línea: 40 [m]. DN:6"</i>	\$2.200	40	\$30	\$3.400	
	<i>Tramo línea: 25 [m]. DN:10"</i>	\$1.400	40	\$30	\$2.600	
Total					\$10.500	

Figura 3-17. Costos en mejora de aislación térmica.

Fuente: Registros de costos según cotizaciones y dimensiones en terreno.

La figura anterior definió los valores estimados para la mejora en aislación térmica de las tuberías del sistema con sus diferentes tramos y secciones. Los valores porcentuales de eficiencia térmica están omitidos debido a falta de información técnica, sin embargo, esta condiciona la actividad.

3.2.6 Beneficio

Ya definido los costos de las actividades propuestas y sus respectivos aumentos en eficiencia térmica (en el caso de la caldera) podemos definir el beneficio que tiene la realización de los trabajos propuestos en relación con el gasto por consumo de combustible de la planta.

En primer lugar, debemos establecer y resumir todo lo visto en este ítem, las propuestas y sus variables vistas en cada tabla nos permiten tener un valor final con respecto al presupuesto. Por otro lado, los valores de aumento de eficiencia térmica nos permiten determinar de manera cuantitativa el beneficio que se obtiene en este trabajo. La figura 3-18 presenta un resumen de los valores desarrollados anteriormente con relación al alcance de cada actividad.

PROPUESTA DE MEJORA EFICIENCIA TERMICA		
Propuestas de mejora	Inversión estimada	Aumento de eficiencia
<i>Perdidas por convección y radiación</i>	\$19.530	3,50%
<i>Perdidas por gases secos</i>	\$4.420	4,25%
<i>Mejora mecánica en soplador</i>	\$2.440	0,50%
<i>Mejora mecánica TK de agua caliente</i>	\$860	
<i>Mejora de aislación térmica en piping</i>	\$10.500	
Total	\$37.750	8,25%

Figura 3-18. Resumen global de variables presupuestarias en propuestas de mejora.

Fuente: Elaboración según datos y registros de cotizaciones y mediciones.

El resumen de la tabla anterior señala que el total de eficiencia proyectada de la presente propuesta se aproxima a un 8,25 por ciento, cabe señalar que estos resultados fueron obtenidos mediante análisis estimado de tablas en tablas relacionadas con la investigación, además de la información literal de textos relacionados con la materia.

Los antecedentes anteriores nos permiten especular la proyección de ahorro en relación con el combustible utilizado de manera trimestral. Teniendo en consideración que las actividades de la propuesta de mejora se realizaran de manera progresiva, también es correcto señalar el beneficio obtenido de manera progresivo, es decir que las actividades que comiencen ha ejecutarse durante los primero tres meses se tengan en consideración de acuerdo con el ahorro obtenido en consumo de combustible.

Para calcular el beneficio o ahorro en el consume del combustible, se utilizará una ecuación de eficiencia la cual se conoce como “ajuste de combustión”, esta ecuación desarrolla la razón entre el cociente de la diferencia de las eficiencias o rendimientos de la caldera y el rendimiento final. La ecuación nos permite obtener un factor de ahorro, el cual se debe multiplicar por la cantidad de litros que consume el equipo (Caldera 410) en un perdido determinado (anual, semestral o trimestral), esta variable se define como C, el

producto de estas variables equivale a los litros de ahorro que se obtienen por el aumento en el rendimiento del equipo.

$$FA = \frac{\eta_{cf} - \eta_{ci}}{\eta_{cf}}$$

$$Ahorro Combustible = FA \times C$$

Por ejemplo, si calculamos la eficiencia en el primer trimestre, donde se ejecutarán las mejoras en pérdidas por convección y radiación, el cálculo de ahorro se define de la siguiente manera:

$$FA = \frac{82,39\% - 78,89\%}{82,39\%}$$

$$FA = 0,0425$$

$$Ahorro \text{ lt} = 0,0425 \times 354.570$$

$$Ahorro \text{ lt} = 15.069$$

$$Ahorro \text{ USD} = 15069 \text{ lt} \times 0,92 \frac{\text{usd}}{\text{lt}}$$

$$Ahorro \text{ USD} = \$13.866$$

El ahorro obtenido en la ecuación por un aumento del 3,50 por ciento en el rendimiento de la caldera nos entrega un beneficio trimestral de \$13.746 USD. Continuando con estos parámetros de cálculo y como señalábamos anteriormente las actividades se realizarán de manera progresiva en periodos trimestrales, debido a esto los

cálculos de rendimiento serán proporcional según la actividad programada y acumulados en el tiempo.

La figura 3-19 muestra tabla de inversión y ahorro, donde se detallan las variables trabajadas en este Item. Se observan las inversiones de cada actividad y sus respectivos aumentos en la eficiencia de la caldera 410, también se realiza el cálculo con el factor de ahorro para obtener el beneficio o ahorro anual acumulado.

	<i>Actividades de mejora</i>	<i>Eficiencia relativa</i>	<i>Eficiencia Acumulada</i>	<i>Inversión relativa USD</i>	<i>Inversión acumulada USD</i>	<i>Factor ahorro</i>	<i>Ahorro trimestral acumulado USD</i>	<i>Utilidad final</i>
Periodo	<i>Eficiencia inicial</i>	-	78,89%	-	\$0	0	\$0	\$0
I	<i>Perdidas por convección y radiación</i>	3,50%	82,39%	\$19.530	\$19.530	0,0425	\$13.857,5	\$-5.673
II	<i>Perdidas por gases secos</i>	4,25%	86,64%	\$4.420	\$23.950	0,0895	\$65.499,4	\$41.549
III	<i>Mejora mecánica en soplador</i>	0,50%	87,14%	\$2.440	\$26.390	0,0947	\$113.597,1	\$87.207
IV	<i>Mejora mecánica TK de agua caliente</i>	-	87,14%	\$860	\$27.250	0,0947	\$161.289,4	\$134.039
	<i>Mejora de aislación térmica en piping</i>	-	87,14%	\$10.500	\$37.750	0,0947	\$161.289,4	\$123.539
	TOTAL		87,14%		\$37.750		\$161.289,4	\$123.539,4
	<i>Consumo 2023 trimestre I</i>	354570						
	<i>Consumo 2023 trimestre II</i>	441344						
	<i>Consumo 2023 trimestre III</i>	508283						
	<i>Consumo 2023 trimestre IV</i>	547550						
	<i>Consumo Anual 2023/ litros</i>	1851747						
	<i>Valor USD Diesel N°2 / litro</i>	\$0,92						

Figura 3-19. Tabla de valores generales en variables de inversión y beneficio.

Fuente: Elaboración exclusiva para trabajo de título. Cálculos obtenidos con variables de la propuesta.

Es importante señalar que hablamos de inversión y no de gasto, pues el financiamiento para la propuesta de mejora proviene netamente de la superintendencia de mantención planta, la cual es autónoma en su presupuesto y no se rige por prestaciones de

otras entidades financieras como bancos, cooperativas, etc. La figura destaca los índices y valores mas relevantes de este trabajo, es decir aquellos valores que se traducen en utilidades, inversiones y beneficio, la tabla nos señala que, durante el primer trimestre, donde se desarrollaran las actividades de perdidas por convección y radiación, la inversión estimada es mayor que el ahorro proyectado, teniendo una utilidad negativa. Sin embargo, en los próximos trimestres que precisan mas desarrollo de actividades de mejora, el beneficio acumulado va en aumento y se aleja de manera considerable de los costos de inversión, obteniendo la mayor utilidad en el cuarto trimestre.

La columna de ahorro final se obtiene en relación con el ahorro acumulado menos la inversión acumulada. Esta cifra nos indica que, al llevar a cabo la propuesta de mejora recomendada en esta obra, el ahorro en términos monetarios será aproximado a \$123.539 USD al año, lo que significa un ahorro bastante significativo en relación con la inversión de la propuesta de mejora desarrollada. La figura 3-20 muestra el grafico de las variables mas relevantes mostradas en la tabla anterior, donde se observan las tendencias de cada variable.

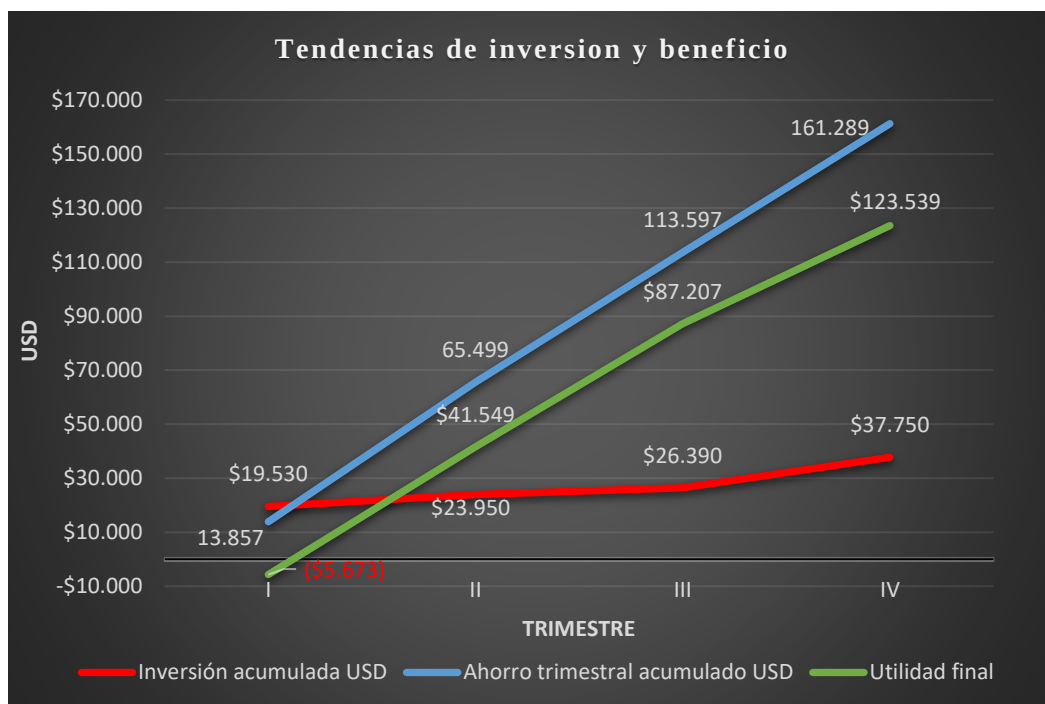


Figura 3-20. Grafico de tendencias de variables económicas en propuesta de mejora.

Fuente: elaboración de cuerdo con tabla de figura 3-19.

La disminución en el consumo de combustible permite ajustar la tendencia real en relación con el budget de cada año, es decir el consumo ira disminuyendo en los próximos años, siguiendo la tendencia de la cantidad de producción esperada, pues en el contexto inicial de este trabajo, el consumo de combustible iba en incremento, aunque la producción disminuyera, provocando un aumento en el margen de costos de producción y significando un problema para la proyección del presupuesto de cada año.

La figura 3-21 muestra un gráfico de tendencias con la producción catódica real y estimada hasta el año 2026, también se representa las tendencias del consumo de combustible, donde se aprecia un leve incremento en el año 2023. En este punto las perdidas de eficiencia son evidentes y comienzan a incrementar el consumo de combustible, la tendencia decrece en los siguientes años, donde se proyecta la propuesta de mejora y se relaciona la producción catódica presupuestada con el consumo estimado, mejorando el beneficio y disminuyendo el costo de centavos de dólar por libra de cobre (cUS\$/lb).

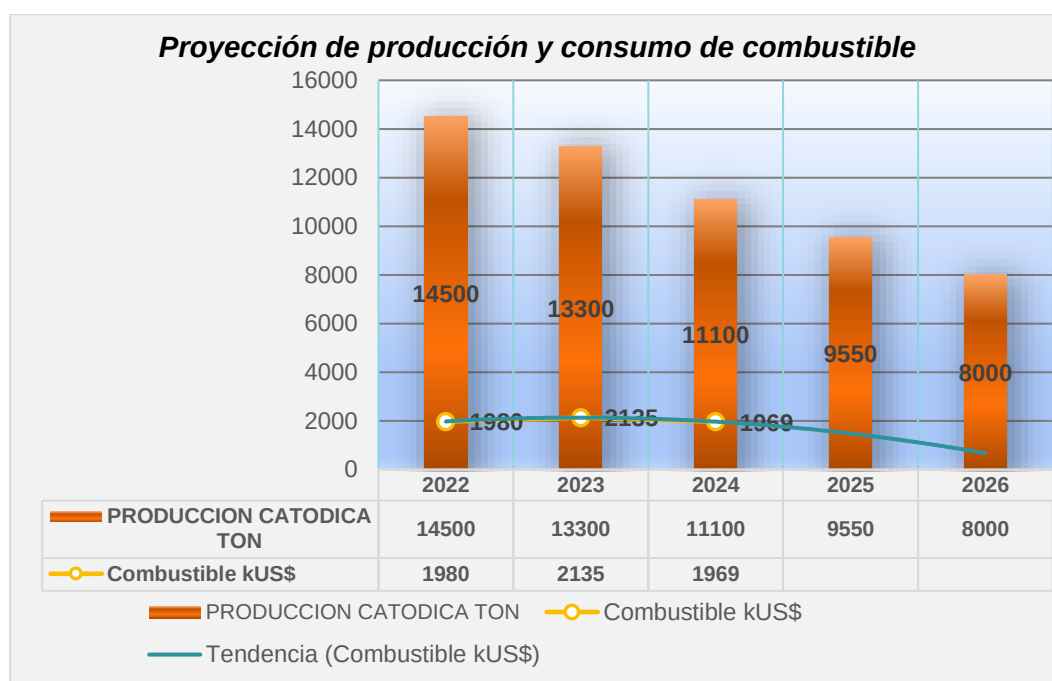


Figura 3-21. Tendencias de consumo en relación con la proyección catódica.

Fuente: Elaboración de acuerdo con el reporte anual MB 2023 y propuesta de mejora.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Para la elaboración de este trabajo se tuvieron que comprender temas de diferentes medios ingenieriles, conceptos de termodinámica, mecánica de fluidos, elementos rotativos, mantenimiento predictivo, etc. Los cuales tomaron mayor sentido en cada análisis de terreno y técnicas predictivas que se realizaron para la elaboración de este trabajo.

Las problemáticas en los procesos deben ser medidas y contextualizadas, es importante conocer bien los procesos a la hora de determinar síntomas o concluir en soluciones, pues un bajo manejo del sistema productivo puede provocar pérdidas de tiempo para llegar a dar solución o fallas catastróficas por desconocimiento en las variables. Lo que busco este informe más allá de los objetivos generales, fue transformar una problemática real y basarla en el desarrollo de mejoras que beneficien la unidad de óxidos. La propuesta de mejora desarrollada en esta obra es contestataria al problema sistemático de la planta, la cual carece de muchos factores en integridad, gestión y calidad de los procesos. Sin embargo, conociendo el funcionamiento de los equipos e indagando en términos técnico-económicos es posible obtener conclusiones que beneficien el proceso sin la necesidad de realizar gastos estratosféricos.

Las actividades de mejora presentadas por la propuesta fueron definidas de acuerdo con criterios e indicadores obtenidos por cálculos, interpretaciones, visitas a terreno e indagaciones sobre las diversas materias inherentes al sistema de calefacción de la planta, esto permitió tener mejor certeza ante las evaluaciones de inversión y beneficio en materias económicas.

Como idea final, el beneficio obtenido en el ahorro de combustible permite disminuir el costo por producción de cada libra de cobre y al mismo tiempo beneficia la integridad de los equipos, aumentando su vida útil y garantizando la producción segura y de calidad.

BIBLIOGRAFIAS

- Artículo tecnico.2012. ***Análisis de la eficiencia de calderas***. Thermal Engineering Ltda.
- Capstone mining. Technical report. Noviembre 2021.Capstone copper.
- Temarios formativos profesionales. 2012. ***Calderas***. Mejoras horizontales de ahorro y eficiencia energética sector industrial. energía térmica. ejemplos prácticos.
- Güiza Pineda, Ronald Fabian (Hugo1). Diciembre,2017. ***Metodología para determinar la eficiencia energética de calderas de baja potencia***. Universidad de Guanajuato.
- C. R. Rubio-Ramírez, G. Martheyn-Lizarazo, L. E. Vera. Septiembre 2019. ***Metodología para el cálculo del desempeño térmico de turbuladores helicoidales en calderas de vapor: modelo matemático y simulación***. Universidad tecnológica de Pereira.
- Ing. Salvador Vega Prado L. Lic. Carlos Enrique Arze. Junio 2011. ***Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor. USAID***.