

Evaluación técnico económica de alternativas de eficiencia energética para la planta concentradora de cobre El Soldado

Diego Orlando García Ramos

2025

Requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:

Dr.-Ing. Margarita Norambuena (UTFSM)

Correferente externo:

Nelson Gutiérrez Osorio (Anglo American)

Comisión:

Dr.-Ing. Margarita Norambuena (UTFSM)

Dr.-Ing. Jorge Juliet (UTFSM)

Valparaíso, enero, 2026.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Evaluación Técnica - económica de alternativas de ubicación exigidas para la planta constructora de cable el Soltero.

Nombre del candidato(a): Diego Orlando García Ramos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: CASA Central Departamento: Ingeniería eléctrica.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena Valdivia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

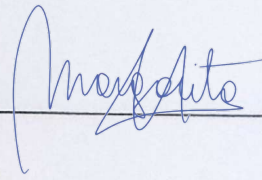
El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

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


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

4.- FIRMAS

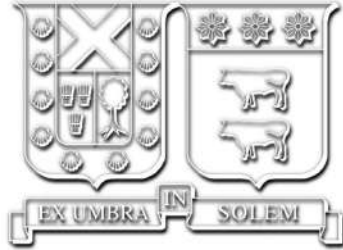
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03-03-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-03-26 Firma: 

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



**Evaluación técnico económica de
alternativas de eficiencia energética para
la planta concentradora de cobre
El Soldado**

Diego Orlando García Ramos

2025

*“Si no hubiera quienes triunfan contra toda probabilidad,
creo que todo el mundo renunciaría”
— Stephen King*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres por la entrega y apoyo durante toda mi vida. Mi mamá Lorena por entregarme los valores, la fortaleza, el apoyo, por levantarse temprano a prepararme la colación y el almuerzo. A mi papá Mauricio por el esfuerzo y dedicación que hace en su trabajo para sostenernos de forma económica, también agradecer por estar presente en cada etapa y ser un ejemplo de superación.

A mi hermana Catalina por la paciencia durante los años que vivimos en viña y el apoyo cuando veía que no podría aprobar algunos ramos de la carrera. A mis roomies Eduardo y Francisca, que son mis primos, agradecerles por la compañía y el apoyo que tuvimos en el departamento.

A mi Ania Pilar, que estuvo en el final de esta larga etapa y me dió la motivación que me faltaba para cerrar este ciclo. Gracias por la paciencia, el apoyo, por siempre estar ahí y darte el tiempo de leer este informe.

A mi familia materna y paterna por el apoyo durante estos años, por preocuparse cuando las cosas no iban resultando. A mi tío Oscar porque siempre creyó en que iba a lograr este objetivo. Agradecer el recibimiento y la integración que me realizó el equipo de sustentabilidad y medio ambiente en la Gerencia SHE. A Don Nelson Gutierrez por las facilidades que me dió durante los 6 meses que duró la memoria en El Soldado. A Nicolás Valenzuela por el apoyo, ser mi tutor e incluirme en las tareas del SGE. A Juan Sanchez y Valentina Estrada por integrarme y enseñarme el área de biodiversidad. A mis compañeros con los que compartí horas de estudio durante estos largos años. Al equipo Roger Munich, con los que jugué 2 años llegando a las 2 finales y siendo campeón en este año.

En especial dedicada en memoria de mi abuelita Rachel Alfaro Salinas, quien fuera parte de todos los procesos de mi vida y no pudo estar, de forma física, en el término de mi carrera universitaria. Tu partida en agosto de este año, me hizo perder la motivación de terminar la memoria, porque siempre quise que me vieras con el título en las manos, pero con el tiempo me dí cuenta que ibas a estar presente en cada momento de mi vida.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	X
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Descripción del proyecto	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Ley 21.305 Sobre eficiencia energética	5
2.2. Norma ISO 50001:2018	5
2.2.1. Eficiencia energética	7
2.2.2. Requisitos de la norma ISO 50001:2018 [1]	7
2.2.2.a. Requisitos medulares	7
2.2.2.b. Requisitos estructurales	8
2.2.3. Planificación energética	8
2.2.3.a. Revisión energética	9
2.2.3.b. Línea de base energética	9
2.2.3.c. Indicador de desempeño energético (IDE)	9
2.2.4. Control operacional	10
2.2.5. Evaluación del desempeño: seguimiento, medición y análisis	10
2.2.6. Mejora	11
2.3. Conceptos básicos sobre armónicas en sistemas eléctricos	12
2.3.1. Definición de armónicos	12
2.3.2. Origen y efectos	12
2.3.3. Resonancia	13
2.3.3.a. Resonancia serie	13
2.3.3.b. Resonancia paralelo	13
2.3.4. Distorsión armónica total	14
2.4. Métodos de reducción de armónicos	15
2.4.1. Filtros	15
2.4.1.a. Filtros pasivos	15

2.4.1.b. Filtros activos	15
2.5. Normativa sobre límites de armónicas en un sistema eléctrico	16
2.5.0.a. Distorsión armónica total de tensión	16
2.5.0.b. Distorsión armónica total de corriente	16
2.6. Evaluación económica	17
2.6.1. Valor Actual Neto (VAN)	17
2.6.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)	17
2.6.3. Periodo de Recuperación	18
2.6.4. Vida Útil del Proyecto	18
2.6.5. Tasa de Descuento	18
3. Contexto energético Operación El Soldado	19
3.1. Sistema de gestión de energía	19
3.1.1. Objetivos y metas	19
3.1.2. Certificación	20
3.2. Descripción de los procesos en El Soldado	20
3.3. Consumos energéticos	22
3.3.1. Molienda SAG	23
3.3.2. Molienda convencional	24
3.3.3. Flotación	26
3.3.4. Tranque de relaves	27
4. Estudio Calidad de Energía y levantamiento de equipos en la planta	29
4.1. Sistema de estudio	29
4.1.1. Equipos utilizados	31
4.1.1.a. Medidor PowerLogic ION9000	31
4.1.1.b. Medidor Sfere 720	31
4.1.1.c. Fluke 1732	32
4.2. Mediciones	33
4.2.1. Barra B	33
4.2.1.a. Potencias y factor de potencia en operación normal	34
4.2.1.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	35
4.2.1.c. Operación con Molino SAG detenido.	36
4.2.2. Barra C	37
4.2.2.a. Potencias y factor de potencia	38
4.2.2.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	39
4.2.3. Barra D	40
4.2.3.a. Potencias	40
4.2.3.b. Factor de potencia	41
4.2.3.c. Distorsión armónica de tensión y corriente	42
4.2.4. Barra G	43
4.2.4.a. Potencias y factor de potencia	44
4.2.4.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	45
4.2.5. CD 300	46
4.2.5.a. Potencias y factor de potencia	47
4.2.5.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	48
4.2.6. CD 301	49
4.2.6.a. Potencias y factor de potencia	50

4.2.6.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	51
4.2.7. CD 302	52
4.2.7.a. Potencias y factor de potencia	53
4.2.7.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	54
4.2.8. Barra J	55
4.2.8.a. Potencias y factor de potencia	56
4.2.8.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	57
4.2.9. Barra F	58
4.2.9.a. Potencias y factor de potencia	59
4.2.9.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	60
4.2.10. Flotación arenas	61
4.2.10.a. Potencias y factor de potencia	62
4.2.10.b. Distorsión armónica de tensión y corriente	63
4.3. Resultados	64
5. Análisis de desempeño energético en las secciones de Molienda Con-	
 vencional	66
5.1. Sistema de estudio	66
5.2. Procesamiento de mineral en las secciones de Molienda Convencional	68
5.3. Análisis de eficiencia energética	69
5.3.1. Criterios de definición de la línea de base energética	69
5.3.2. Criterios de elección variables relevantes	69
5.3.3. Elección del año de línea base energética	70
5.3.4. Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2023	71
5.3.4.a. Molienda 1	71
5.3.4.b. Molienda 2	74
5.3.4.c. Molienda 3	77
5.3.4.d. Molienda 4	80
5.3.5. Desempeño energético Molienda 1	83
5.3.5.a. Año 2024	83
5.3.5.b. Año 2025	85
5.3.5.c. Operación	86
5.3.6. Desempeño energético Molienda 2	88
5.3.6.a. Año 2024	88
5.3.6.b. Año 2025	89
5.3.6.c. Operación	91
5.3.7. Desempeño energético Molienda 3	92
5.3.7.a. Año 2024	92
5.3.7.b. Año 2025	94
5.3.7.c. Operación	95
5.3.8. Desempeño energético Molienda 4	96
5.3.8.a. Año 2024	96
5.3.8.b. Año 2025	98
5.3.8.c. Operación	99

6.	Análisis de desempeño energético en Flotación	101
6.1.	Sistema de estudio	101
6.1.1.	Flotación Pre-Rougher	102
6.1.2.	Flotación Rougher	102
6.1.3.	Flotación Scavenger	103
6.1.4.	Flotación Arenas	103
6.1.5.	Remolienda	105
6.1.6.	Flotación: Columna 1, 2 y espesadores	105
6.2.	Análisis de eficiencia energética	106
6.2.1.	Criterios de definición de la línea de base energética	106
6.2.2.	Criterios de elección variables relevantes	106
6.2.3.	Elección del año de línea base energética	107
6.2.4.	Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2023	107
6.3.	Desempeño energético	112
6.3.1.	Año 2024	112
6.3.2.	Año 2025	113
7.	Análisis de desempeño energético en Molienda SAG	115
7.1.	Sistema de estudio	115
7.2.	Análisis de eficiencia energética	116
7.2.1.	Criterios de definición de la línea de base energética	116
7.2.2.	Criterios de elección variables relevantes	116
7.2.3.	Elección del año de línea base energética	117
7.2.4.	Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2022	118
7.2.5.	Desempeño energético	121
7.2.5.a.	Año 2024	121
7.2.5.b.	Año 2025	123
7.2.5.c.	Operación	124
8.	Propuestas de mejora eficiencia energética	128
8.1.	Integración de filtros armónicos en CD 300 Y CD 302	128
8.1.1.	Objetivo	128
8.1.2.	Propuesta de mejora	128
8.1.3.	Antecedentes	129
8.1.4.	Caso 1: Filtro armónico en CCM 600	132
8.1.4.a.	Consecuencias de los armónicos en el CCM 600	133
8.1.4.b.	Efecto de la integración del filtro armónico	133
8.1.4.c.	Evaluación económica de la solución	135
8.1.5.	Caso 2: Filtro activo en CD 302	136
8.1.5.a.	Efecto de la integración del filtro activo	138
8.1.5.b.	Evaluación económica de la solución	139
8.1.6.	Caso 3: Filtro activo en CD 300	140
8.1.6.a.	Efecto de la integración del filtro activo	141
8.1.6.b.	Evaluación económica de la solución	142
8.2.	Compensación de reactivos en CD 301	144
8.2.1.	Objetivo	144
8.2.2.	Propuesta de mejora	144
8.2.3.	Antecedentes	144

8.2.4.	Caso 1: Banco de condensadores en CD 301	144
8.2.4.a.	Evaluación económica de la solución	147
8.3.	Motores de alta eficiencia en celdas de flotación Wenco 1000	148
8.3.1.	Objetivo	148
8.3.2.	Propuesta de mejora	148
8.3.3.	Antecedentes	148
8.3.4.	Caso 1: Compra de motores originales de eficiencia IE2 93,5 %	149
8.3.4.a.	Impacto en el desempeño energético de Flotación	150
8.3.5.	Caso 2: Cambio de motores a eficiencia IE4 95,7 %	151
8.3.5.a.	Impacto en el desempeño energético de Flotación	151
8.3.6.	Evaluación económica de las propuestas	153
8.4.	Gestionar el consumo en Flotación mediante el uso de los medidores en línea	154
8.4.1.	Objetivo	154
8.4.2.	Descripción general	154
8.4.3.	Antecedentes	154
8.4.4.	Revisión de los medidores de energía	156
8.4.5.	Plan de acción	158
8.4.6.	Efecto en el desempeño energético reportado por el SGE	160
8.5.	Otras oportunidades de mejora en eficiencia energética	161
8.5.1.	Corregir estados de operación en Molienda Convencional	161
8.5.1.a.	Objetivo	161
8.5.1.b.	Propuesta de mejora	161
8.5.2.	Definición del tiempo crítico de operación en vacío del Molino SAG	161
8.5.2.a.	Objetivo	161
8.5.2.b.	Propuesta de mejora	161
9.	Conclusiones	163
9.1.	Conclusiones	163
 Apéndices		165
A.	Cotizaciones	165
A.1.	Filtros armónicos	165
A.1.1.	Anexo: Cotización de filtros activos y batería de condensadores	165
A.2.	Motores celdas de flotación	166
A.2.1.	Cotización motores BALDOR-RELIANCE	166
A.2.2.	Cotización motores TOSHIBA	166
A.2.3.	Cotización reparación motor 75 HP	167
 Bibliografía		168

Índice de Figuras

1.1.	Molino SAG, El Soldado.	2
2.1.	Modelo de gestión de la energía según la Guía de Implementación de SGE (2022) [2].	6
2.2.	Estrategias para un control operacional eficiente. Fuente: Guía implementación Norma ISO 50001:2018 [2]	10
2.3.	Aspectos a los cuales realizar evaluación de desempeño. Fuente: Guía implementación Norma ISO 50001:2018 [2]	11
2.4.	Esquema resonancia serie [3].	13
2.5.	Esquema resonancia paralelo [3].	13
3.1.	Diagrama de procesos planta. Fuente [4]	21
3.2.	Distribución consumos energéticos. Revisión energética 2024 [4]	22
3.3.	Distribución de los consumos energéticos El Soldado año 2024.	22
3.4.	Esquema resumen Molienda SAG.	23
3.5.	Proporción consumos eléctricos Molienda SAG, año 2024.	23
3.6.	Esquema resumen Molienda Convencional.	24
3.7.	Proporción consumos eléctricos Molienda Convencional, año 2024.	25
3.8.	Esquema resumen Celdas de flotación Wenco 1500 y 1000.	26
3.9.	Proporción consumos eléctricos Flotación, año 2024.	27
3.10.	Esquema resumen Agua fresca Tranque de relaves.	27
3.11.	Proporción consumos eléctricos Tranque, año 2024.	28
4.1.	Diagrama unilineal simplificado.	30
4.2.	Equipos alimentados por la barra B [5]	33
4.3.	Potencias barra B	34
4.4.	Factor de potencia barra B	34
4.5.	Distorsión armónica de corriente barra B	35
4.6.	Distorsión armónica de tensión barra B	35
4.7.	Potencias barra B salida SAG	36
4.8.	Distorsión armónica de corriente barra B salida SAG	36
4.9.	Esquema Barra C.	37
4.10.	Potencias barra C.	38
4.11.	Factor de potencia barra C	38
4.12.	Distorsión armónica de corriente barra C	39
4.13.	Distorsión armónica de tensión barra C	39
4.14.	Comportamiento de las potencias en la barra D.	40
4.15.	Factor de potencia barra D	41
4.16.	Distorsión armónica de corriente barra D	42

4.17.	Distorsión armónica de tensión barra D	42
4.18.	Distribución barra G.	43
4.19.	Comportamiento potencias barra G.	44
4.20.	Factor de potencia barra G.	44
4.21.	Distorsión armónica de corriente barra Flotación	45
4.22.	Distorsión armónica de tensión barra Flotación	45
4.23.	Equipos alimentados por los CD300.	46
4.24.	Comportamiento potencias CD 300.	47
4.25.	Factor de potencia CD 300	47
4.26.	Distorsión armónica de corriente CD 300	48
4.27.	Distorsión armónica de tensión CD 300	48
4.28.	Equipos alimentados por los CD301.	49
4.29.	Comportamiento potencias CD 301.	50
4.30.	Factor de potencia CD 301	50
4.31.	Distorsión armónica de corriente CD 301	51
4.32.	Distorsión armónica de tensión CD 301	51
4.33.	Equipos alimentados por los CD302.	52
4.34.	Comportamiento potencias CD 302.	53
4.35.	Factor de potencia CD 302	53
4.36.	Distorsión armónica de corriente CD 302	54
4.37.	Distorsión armónica de tensión CD 302	54
4.38.	Distribución barra J [5].	55
4.39.	Comportamiento potencias barra J.	56
4.40.	Factor de potencia barra J.	56
4.41.	Distorsión armónica de corriente barra J.	57
4.42.	Distorsión armónica de tensión barra J.	57
4.43.	Diagrama conexión de la barra F [5].	58
4.44.	Comportamiento potencias barra F.	59
4.45.	Factor de potencia barra F.	59
4.46.	Distorsión armónica de corriente barra F.	60
4.47.	Distorsión armónica de tensión barra F.	60
4.48.	Diagrama conexión de la Flotación Arenas [5].	61
4.49.	Comportamiento potencias Flotación arenas.	62
4.50.	Factor de potencia Flotación arenas.	62
4.51.	Distorsión armónica de corriente Flotación arenas.	63
4.52.	Distorsión armónica de tensión Flotación arenas.	63
5.1.	Sistema de estudio secciones Molienda Convencional	67
5.2.	Distribución del procesamiento de mineral en las secciones de molienda convencional año 2025.	68
5.3.	Tendencia del consumo eléctrico y material procesado en la sección 2 de Molienda Convencional.	70
5.4.	Gráfico consumos versus material procesado año 2023 - Molienda 1.	71
5.5.	Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 1.	72
5.6.	Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 1.	72
5.7.	Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 1 año 2023	73
5.8.	Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 2.	74
5.9.	Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 2.	75

5.10.	Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 2.	75
5.11.	Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 2 año 2023 .	76
5.12.	Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 3.	77
5.13.	Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 3. . . .	78
5.14.	Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 3.	78
5.15.	Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 3 año 2023 .	79
5.16.	Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 4.	80
5.17.	Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 4. . . .	81
5.18.	Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 4.	81
5.19.	Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 4 año 2023 .	82
5.20.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 1 año 2024.	84
5.21.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 1 año 2025.	85
5.22.	Estados de operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025	86
5.23.	Operación molienda 1 durante los años 2023, 2024 y 2025.	87
5.24.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 2 año 2024.	88
5.25.	Comparación Indicador de desempeño energético real y modelo Molienda 2 año 2025.	90
5.26.	Estados de operación Sección 2 Molienda Convencional.	91
5.27.	Operación molienda 2 durante los años 2023, 2024 y 2025.	92
5.28.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 3 año 2024.	93
5.29.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 3 año 2025.	94
5.30.	Estados de operación Sección 3 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025	95
5.31.	Operación molienda 3 durante los años 2023, 2024 y 2025.	96
5.32.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 4 año 2024.	97
5.33.	Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Mo- lienda 4 año 2025.	98
5.34.	Estados de operación Sección 4 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025	99
5.35.	Operación molienda 4 durante los años 2023, 2024 y 2025.	100
6.1.	Esquema flotación Pre-Rougher.	102
6.2.	Esquema flotación Rougher.	102
6.3.	Esquema flotación Scavenger.	103
6.4.	Esquema flotación Arenas.	104
6.5.	Esquema Remolienda.	105
6.6.	Esquema Columna 1, 2 y espesadores.	105
6.7.	Gráfico consumos versus Material procesado año 2023 - Flotación.	108
6.8.	Gráfico consumos versus toneladas de relaves año 2023 - Flotación.	108
6.9.	Gráfico consumos versus Toneladas de concentrado año 2023 - Flotación.	109
6.10.	Gráfico consumos vs Ley de concentrado año 2023 - Flotación.	109
6.11.	Comparación del consumo eléctrico real y el consumo eléctrico del modelo matemático en el año 2023	111

6.12.	Comparación de los Indicadores de desempeño energético en Flotación año 2024.	112
6.13.	Comparación de los Indicadores de desempeño energético en Flotación año 2025.	113
7.1.	Esquema simplificado Molienda SAG.	116
7.2.	Tendencia del consumo eléctrico y material procesado durante los años 2020 al 2025.	118
7.3.	Gráfico de dispersión entre consumo eléctrico y material procesado Molienda SAG año 2022.	119
7.4.	Gráfico de dispersión entre consumo eléctrico y horas de operación Molienda SAG año 2022.	120
7.5.	Gráfico de dispersión entre consumo eléctrico y toneladas por hora Molienda SAG año 2022.	120
7.6.	Comparación de los indicadores de desempeño energético en Molienda SAG año 2024.	122
7.7.	Comparación de los indicadores de desempeño energético en Molienda SAG año 2025.	123
7.8.	Estados de operación de los motores del molino SAG en Julio de 2025. . .	124
8.1.	Distorsión armónica total de corriente en el CCM 600.	130
8.2.	Espectro armónico de corriente en el CCM 600.	130
8.3.	Espectro armónico de corriente en el CCM 400.	131
8.4.	Distorsión armónica total de corriente en el CCM 400.	132
8.5.	Dimensión del filtro activo por mediciones.	137
8.6.	Dimensión del filtro activo por mediciones en CD 300.	140
8.7.	Dimensión del banco de condensadores por mediciones en CD 301.	145
8.8.	Load characteristics IEC LV motors ABB [6].	149
8.9.	Reducción del IDE de flotación por el cambio a motores de eficiencia IE4 caso 1.	150
8.10.	Reducción del IDE de flotación en el caso 2.	152
8.11.	Tendencia del consumo eléctrico en flotación entre los años 2024 y septiembre 2025	155
8.12.	Tendencia del consumo eléctrico en los CCM ubicados en las celdas de flotación durante los años 2024 y 2025.	157
8.13.	Comparación lectura medidores análogo y digital en el CCM Rougher 2. .	157
8.14.	Consumo eléctrico corrigiendo la lectura del medidor ubicado en CCM Rougher 2.	158
8.15.	Consumo eléctrico utilizando los medidores digitales desde julio 2025. . .	159
8.16.	Comparación del indicador de desempeño energético corrigiendo la lectura de los medidores.	160
A.1.	Cotización enviado por Flopower.	166
A.2.	Cotización enviado por Maisver.	167

Índice de Tablas

2.1.	Valores permitidos THD tensión [7].	16
2.2.	Valores permitidos de distorsión de corriente armónica para tensiones entre 120 [V] y 69 [kV] [7].	16
2.3.	Valores permitidos THD corriente desde 69 [kV] hasta 161 [kV] [7].	17
3.1.	Distribución de los consumos energéticos Molienda SAG año 2025.	23
3.2.	Distribución de los consumos energéticos Molienda Convencional año 2025.	25
3.3.	Distribución de los consumos energéticos Flotación año 2025.	26
3.4.	Distribución de los consumos energéticos Tranque año 2025.	28
4.1.	Factor de potencia Barra B.	34
4.2.	Distorsión armónica Barra B.	35
4.3.	Factor de potencia Barra C.	38
4.4.	Distorsión armónica Barra C.	39
4.5.	Equipos alimentados Barra D.	40
4.6.	Factor de potencia Barra D.	41
4.7.	Distorsión armónica tensión Barra D.	42
4.8.	Factor de potencia barra G.	44
4.9.	Distorsión armónica de tensión barra G.	45
4.10.	Equipos alimentados por CD 300.	46
4.11.	Factor de potencia CD 300.	47
4.12.	Distorsión armónica de tensión CD 300.	48
4.13.	Equipos alimentados por CD 301.	49
4.14.	Factor de potencia CD 301.	50
4.15.	Distorsión armónica de tensión CD 301.	51
4.16.	Equipos alimentados por CD 302.	52
4.17.	Factor de potencia CD 302.	53
4.18.	Distorsión armónica de tensión CD 302.	54
4.19.	Factor de potencia barra J.	56
4.20.	Distorsión armónica de tensión barra J.	57
4.21.	Factor de potencia Barra F.	59
4.22.	Distorsión armónica de corriente Barra F.	60
4.23.	Factor de potencia Flotación arenas.	62
4.24.	Distorsión armónica de corriente Flotación arenas.	63
4.25.	Resultados distorsión armónica de corriente.	64
4.26.	Resultados distorsión armónica de tensión.	64
4.27.	Resultados factor de potencia.	65
5.1.	Motores de las secciones de Molienda Convencional.	67

5.2.	Cumplimiento criterios año base.	70
5.3.	Información recopilada de variables relevantes Molienda 1 año 2023.	71
5.4.	Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 1.	73
5.5.	Información recopilada de variables relevantes Molienda 2 año 2023.	74
5.6.	Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 2.	76
5.7.	Información recopilada de variables relevantes Molienda 3 año 2023.	77
5.8.	Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 3.	79
5.9.	Información recopilada de variables relevantes Molienda 4 año 2023.	80
5.10.	Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 4.	82
5.11.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 1 2024.	83
5.12.	Comparación corregida de los IDE real y proyectado en Molienda 1, año 2024.	84
5.13.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 1 2025.	85
5.14.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 1 año 2025.	86
5.15.	Resumen operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025	87
5.16.	Resumen operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de agosto 2025	87
5.17.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 2 2024.	88
5.18.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 2 año 2024.	89
5.19.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 2 2025.	89
5.20.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 2 año 2025.	90
5.21.	Resumen operación Sección 2 Molienda Convencional mes de julio.	91
5.22.	Resumen operación Sección 2 Molienda Convencional mes de agosto.	91
5.23.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 3 2024.	92
5.24.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 3 año 2024.	93
5.25.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 3 2025.	94
5.26.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 3 año 2025.	95
5.27.	Resumen operación Sección 3 Molienda Convencional en el mes de julio.	95
5.28.	Resumen operación Sección 3 Molienda Convencional en el mes de agosto.	95
5.29.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 4 2024.	96
5.30.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 4 año 2024.	97
5.31.	Parámetros de eficiencia energética Molienda 4 2025.	98
5.32.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 4 año 2025.	99
5.33.	Resumen operación Sección 4 Molienda Convencional mes de julio.	99
5.34.	Resumen operación Sección 4 Molienda Convencional mes de agosto.	100
6.1.	Cumplimiento criterios año base.	107
6.2.	Información recopilada variables relevantes Flotación 2023.	107
6.3.	Verificación cumplimiento variables relevantes flotación.	110
6.4.	Verificación cumplimiento modelo flotación.	110
6.5.	Comparación de los Consumos real y proyectado en el proceso de Flotación año 2023.	111
6.6.	Comparación de los IDE real y proyectado en Flotación año 2024.	113
6.7.	Comparación de los IDE real y proyectado en Flotación año 2025.	114
7.1.	Cumplimiento criterios año base.	118
7.2.	Variables relevantes Molienda SAG año 2022.	119
7.3.	Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda SAG.	121
7.4.	Parámetros de eficiencia energética Molienda SAG año 2024.	121

7.5.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda SAG año 2024.	122
7.6.	Parámetros de eficiencia energética Molienda SAG año 2025.	123
7.7.	Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda SAG año 2025.	124
7.8.	Operación de los motores Molino SAG en julio 2025.	125
7.9.	Operación en vacío motores Molino SAG en julio 2025.	125
7.10.	Operación de los motores Molino SAG en agosto 2025.	126
7.11.	Operación en vacío motores Molino SAG en agosto 2025.	126
7.12.	Operación de los motores Molino SAG en agosto 2025.	127
7.13.	Operación en vacío motores Molino SAG en septiembre 2025.	127
8.1.	Mediciones de potencia en el CD 302.	129
8.2.	Mediciones de potencia en el CCM 600.	129
8.3.	Mediciones de potencia en el CD 300.	131
8.4.	Consumos mensuales para cada caso en el CCM 600.	134
8.5.	Ahorro energético mensual para cada caso en el CCM 600.	134
8.6.	Evaluación económica considerando CCM 600 al 70 % de carga.	135
8.7.	Consumos mensuales para un motor de 100 HP en el CD 302.	138
8.8.	Ahorro energético mensual para los equipos alimentados por el CD 302.	138
8.9.	Evaluación económica considerando casos al 70 % de carga.	139
8.10.	Consumos mensuales de un motor de 100 HP para los casos planteados en el CD 300.	142
8.11.	Ahorro energético mensual estimado para los equipos alimentados por el CD 300.	142
8.12.	Evaluación económica de filtros activos considerando una vida útil de 10 años.	143
8.13.	Mediciones de potencia en el CD 301.	144
8.14.	Tramos y configuraciones considerados en la evaluación técnica.	146
8.15.	Reducción de pérdidas por efecto Joule y ahorro energético anual, opera- ción efectiva del 95 %.	146
8.16.	Indicadores económicos para la compensación de reactivos en CD 301 considerando pérdidas de carga del transformador y tramos de baja tensión.	148
8.17.	Consumos mensuales en [kWh] de ambos casos.	150
8.18.	Comparación de la mejora con el caso actual.	151
8.19.	Consumos mensuales en [kWh] de ambos casos.	151
8.20.	Comparación de la mejora del caso 2 con el caso actual.	152
8.21.	Resultados de la evaluación económica de alternativas de motores para celdas Wenco 1000.	153
8.22.	Indicadores económicos considerando depreciación lineal y TIE = 10 %.	153
8.23.	Identificación de los equipos tomados por los distintos CCM de las celdas de flotación.	156
8.24.	Diferencia en los consumos y centros de costo al utilizar medidor digital en Rougher 2.	158
8.25.	Diferencia en los consumos y centros de costo al utilizar los medidores digitales.	159
8.26.	Variación respecto a la meta del indicador de desempeño energético de flotación en los 3 casos.	160

A.1.	Cotización de equipos para compensación de reactivos y filtrado de armónicos.	165
A.2.	Cotización de motores BALDOR-Reliance para celdas de flotación (FERAM, 2025).	166

Resumen

La presente memoria aborda la gestión energética de la planta concentradora El Soldado, en el marco de la Ley 21.305 sobre Eficiencia Energética [8] y la norma ISO 50001:2018 [1], que exigen a las organizaciones identificar sus áreas de uso significativo de energía y establecer planes de mejora continua. El estudio se focalizó en los procesos de molienda SAG, molienda convencional y flotación, que en conjunto representan más del 78 % del consumo eléctrico de la operación.

El levantamiento de consumos permitió dimensionar la magnitud del uso energético en cada proceso y detectar desviaciones relevantes respecto a modelos de referencia. La molienda SAG se consolidó como el principal consumidor, con un 43 % del total, mientras que la flotación mostró las mayores ineficiencias, con indicadores de desempeño energético superiores en más de un 50 % a lo proyectado. Estos hallazgos evidencian la necesidad de medidas correctivas tanto en la operación como en la infraestructura eléctrica.

En respuesta, se desarrollaron cuatro propuestas de solución que combinan criterios técnicos, económicos y normativos: la instalación de filtros activos de armónicos en CD 300 y CD 302 para reducir distorsión y mejorar el factor de potencia; la compensación de reactivos en CD 300 para asegurar cumplimiento regulatorio y liberar capacidad operativa; el reemplazo de motores en celdas Wenco 1000 por unidades de alta eficiencia IE4, con retornos de inversión inferiores a tres años; y la gestión del consumo en flotación mediante medidores digitales, que permitió corregir errores de medición y asegurar trazabilidad en los reportes energéticos. Todas estas medidas se alinean con los principios de la ISO 50001:2018, que enfatiza la mejora continua y el control de indicadores energéticos.

Adicionalmente, se identificaron oportunidades de optimización operativa, como la reducción de arranques en la molienda convencional y la definición de un tiempo crítico de operación en vacío para el molino SAG. Estas acciones, de bajo costo relativo, refuerzan la sostenibilidad y confiabilidad del sistema.

En síntesis, el proyecto confirma la viabilidad de integrar soluciones técnicas y de gestión que no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también aseguran el cumplimiento normativo y fortalecen la competitividad de la operación minera. La combinación de inversiones estratégicas y ajustes operativos posiciona a El Soldado en un camino de mejora continua, en línea con los compromisos nacionales e internacionales en eficiencia energética.

Capítulo 1

Introducción

Este informe se enmarca en los esfuerzos de mejora continua del desempeño energético que impulsa AngloAmerican Chile en la Planta Concentradora El Soldado, ubicada en la comuna de Nogales, Región de Valparaíso. Esta operación minera se caracteriza por un alto consumo energético, siendo los procesos de molienda y flotación los más demandantes en términos eléctricos, representando en conjunto más del 70 % del consumo total de la planta. Ambos procesos son considerados Áreas de Uso Significativo de Energía (USEs), por lo que su monitoreo y optimización resultan fundamentales para mejorar la eficiencia general del sistema. Según el reporte energético del año 2024 [4] la molienda SAG alcanza un 46 % del consumo total de la planta. Consolidándose como la etapa de mayor demanda energética dentro del circuito de concentración. Este alto consumo se explica por la naturaleza intensiva del proceso, donde grandes volúmenes de mineral son reducidos a tamaños más finos mediante el uso de molinos de gran escala y alta potencia. El molino SAG (Semi-Autógeno), en particular, opera con dos motores de 6250 [HP], lo que lo convierte en un equipo crítico desde el punto de vista del desempeño energético.

La figura 1.1 muestra el molino SAG de la Planta Concentradora El Soldado, ilustrando su magnitud y relevancia dentro del sistema productivo:



Figura 1.1: Molino SAG, El Soldado.

La compañía ha adoptado un enfoque basado en la Norma Internacional ISO 50001:2018 [1], la cual entrega directrices para establecer, mantener y mejorar sistemas de gestión de la energía en organizaciones de todo tipo. Esta norma promueve un uso más eficiente de

la energía mediante una estructura sistemática, que incluye la medición, análisis de desempeño, establecimiento de metas, implementación de planes de acción y seguimiento de resultados. En el caso de El Soldado, se ha fijado como uno de los principales desafíos la reducción del Indicador de Desempeño Energético (IDE), medido en kWh por tonelada procesada, específicamente en el proceso de molienda, apuntando a una disminución del 2% respecto a la línea base proyectada para el año 2024. Para cumplir esta meta, AngloAmerican ha comenzado la implementación de un sistema de medición y monitoreo energético con alta resolución temporal, el cual permite registrar datos de consumo cada minuto. Esta tecnología entrega una visión detallada del comportamiento eléctrico de los equipos, permitiendo detectar ineficiencias operativas, identificar oportunidades de mejora y facilitar la toma de decisiones informadas en tiempo real. En la práctica, esto implica poder observar cómo varía el consumo ante cambios de carga, arranques, detenciones o condiciones anómalas que, de otro modo, pasarían desapercibidas en análisis convencionales basados en promedios horarios o diarios. No obstante, y pese a contar con esta infraestructura de datos, actualmente no se ha desarrollado un estudio específico que utilice dicha información para proponer medidas de mejora energética concretas, ni tampoco para evaluar su factibilidad técnica y económica. En este contexto, la presente memoria busca analizar el comportamiento energético de los equipos críticos de molienda y flotación –como el molino SAG, bombas de recirculación, celdas de flotación, entre otros– para identificar patrones de operación subóptimos, consumos anómalos o fluctuaciones significativas que puedan ser corregidas o atenuadas mediante estrategias específicas. Dentro de las soluciones técnicas que se evaluarán se encuentra la posibilidad de implementar filtros de armónicas, especialmente en equipos de gran potencia con variadores de velocidad, con el objetivo de reducir pérdidas por distorsión eléctrica y mejorar la calidad de la energía. Otra línea de acción considera la revisión de los modos de operación de los equipos para garantizar que funcionen en sus rangos óptimos, evitando sobredimensionamientos o sobrecargas que incrementen innecesariamente el consumo.

Además de mejorar el desempeño energético, estas acciones permitirán generar evidencia documentada que refuerce la conformidad del sistema de gestión con los requisitos de la norma ISO 50001:2018 [1], facilitando auditorías internas y externas, y apoyando la trazabilidad de las decisiones técnicas en el tiempo. Esta documentación también puede ser utilizada como base para replicar mejoras en otras áreas de la planta o en operaciones similares dentro del grupo minero. Por lo tanto, esta memoria no solo representa una contribución técnica relevante para el área de eficiencia energética, sino que también constituye una herramienta práctica de apoyo a la gestión operativa de El Soldado. Los resultados esperados incluyen una reducción medible del consumo energético, una mejora en la estabilidad de los procesos productivos, y un aporte concreto a la sostenibilidad de la operación, alineado con los compromisos corporativos de responsabilidad ambiental y optimización de recursos.

1.1. Descripción del proyecto

El proyecto de memoria de titulación tiene como objetivo principal identificar oportunidades de mejora en la eficiencia energética de los procesos de molienda y flotación en la planta concentradora de El Soldado. Esta iniciativa se enmarca en el principio de mejora continua establecido por la norma ISO 50001:2018 [1], que exige la presentación de proyectos orientados a optimizar el desempeño energético en las áreas de uso significativo de la energía. Asimismo, responde al cumplimiento de la Ley 21.305 sobre eficiencia energética [8], que promueve la implementación de medidas concretas para reducir consumos y mejorar la gestión energética en instalaciones industriales.

La metodología contempla un levantamiento detallado de información sobre el proceso productivo, los equipos asociados, las metas corporativas y el sistema de gestión de la energía actualmente implementado. A partir de esta base, se realizará un diagnóstico del contexto de los consumos eléctricos con el fin de identificar los puntos críticos donde las mejoras propuestas generen mayor impacto. El análisis se centrará en el desempeño energético de la molienda convencional, la molienda SAG y el proceso de flotación, evaluando indicadores de consumo específico y eficiencia para detectar ineficiencias operacionales.

Finalmente, se definirán las oportunidades de mejora y se propondrán soluciones que permitan optimizar el uso de la energía en la planta. Estas propuestas estarán respaldadas por un estudio técnico-económico que justifique su implementación, asegurando que las medidas contribuyan tanto al cumplimiento normativo como a la sostenibilidad y competitividad de la operación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar y proponer mejoras en el desempeño energético de las áreas de Uso Significativo de Energía (USEs) en minera El Soldado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento de la Planta Concentrada, sus procesos, equipos y los consumos de energía y eficiencia energética.
- Gestionar el consumo energético en los procesos de molienda y flotación mediante la implementación y análisis de datos obtenidos en los nuevos medidores en línea.
- Realizar un análisis de distorsión armónica en los equipos de molienda y flotación, evaluando la viabilidad de integrar filtros que contribuyan a la reducción de pérdidas energéticas y mejoren la calidad de la energía.
- Identificar alternativas para reducir el consumo específico de energía kWh/ton y mejorar la eficiencia energética de la planta.
- Proponer alternativas de eficiencia energética para los procesos de la planta concentradora de cobre El Soldado, considerando distribución energética para minimizar picos de demanda y mejorar el uso de energía en la planta.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ley 21.305 Sobre eficiencia energética

La Ley N° 21.305 [8], publicada el 13 de febrero de 2021, establece un marco legal para promover la eficiencia energética en Chile, con el objetivo de mejorar la competitividad, reducir emisiones y contribuir a la sostenibilidad ambiental. La normativa exige la elaboración de Planes de Gestión de Energía (PGE) para grandes consumidores, definidos como aquellos que superan los 50 terajoules (TJ) anuales, obligándolos a implementar sistemas de gestión de la energía bajo estándares reconocidos, como la norma ISO 50001.

En el ámbito industrial y minero, la ley obliga a identificar y gestionar Áreas de Uso Significativo de Energía (USE), promoviendo la medición, análisis y mejora continua de su desempeño energético. Además, impulsa la incorporación de nuevas tecnologías, la formación de gestores energéticos y la cultura de eficiencia energética a nivel organizacional.

La ley también crea un Registro de Consumidores con Obligación de Gestión de Energía y otorga atribuciones a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) para fiscalizar su cumplimiento. Esta normativa es clave para la transición energética del país y alinea las operaciones industriales con compromisos ambientales internacionales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2. Norma ISO 50001:2018

Fue publicada por la International Organization for Standardization (ISO) en el año 2011 y actualizada en 2018 [1]. La norma establece un marco estructurado para que las organizaciones implementen de manera eficaz un Sistema de Gestión de Energía (SGE), promoviendo mejoras sostenidas en el uso y desempeño energético. Su enfoque permite transformar la forma en que se gestiona la energía, impulsando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de costos operacionales y el fortalecimiento de la competitividad, todo sin afectar la productividad. Además, define los requisitos necesarios para establecer, operar, mantener y perfeccionar un SGE, abarcando aspectos como la medición, documentación y reporte del desempeño energético, así como el diseño eficiente de equipos y procesos. La normativa busca romper con la visión reactiva basada en el alza de costos, fomentando una cultura de mejora continua y planificación estratégica en la gestión energética.

Asimismo, la Guía de Implementación de Sistemas de Gestión de Energía publicada por la Agencia de Sostenibilidad Energética [2] entrega lineamientos prácticos para aplicar los principios de la norma en organizaciones industriales, facilitando la transición hacia una gestión energética más eficiente.

En el proceso de mejora continua se realiza un enfoque cíclico, también conocido como ciclo de Deming. La figura 2.1 muestra este esquema cíclico donde se establecen los requisitos para las cuatro etapas del proceso.

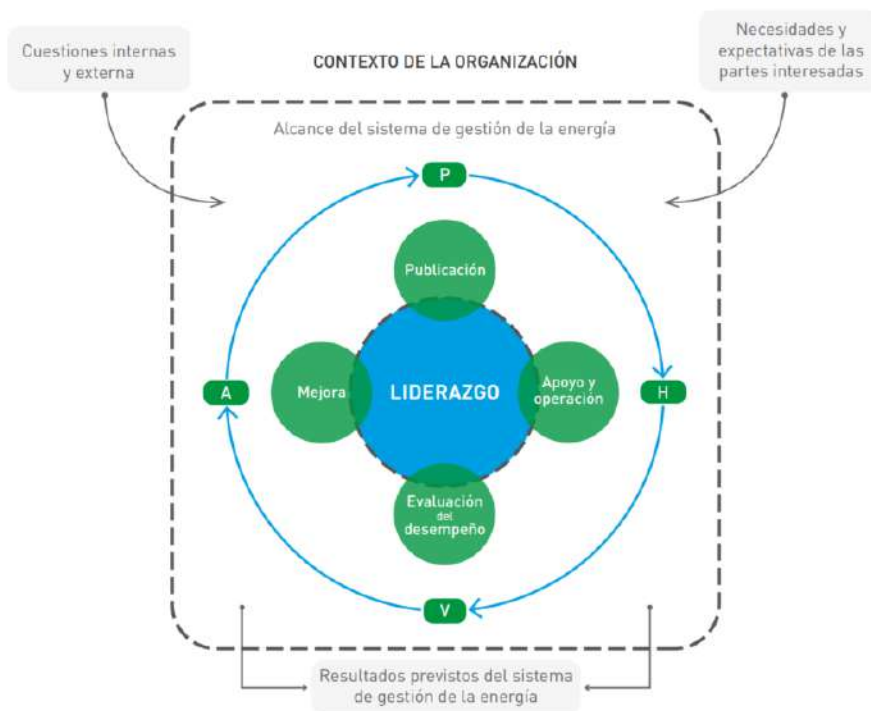


Figura 2.1: Modelo de gestión de la energía según la Guía de Implementación de SGE (2022) [2].

El ciclo de Deming facilita la evaluación continua de una actividad, permitiendo incorporar mejoras de manera progresiva. Este ciclo se estructura en cuatro etapas, conocidas como PHVA: Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, cada una orientada a consolidar un proceso de mejora continua.

1. Planificar: Esta etapa se enfoca en analizar el uso de la energía dentro de la organización, con el propósito de definir los recursos, metas, acciones y controles necesarios que permitan lograr mejoras concretas en el rendimiento energético.
2. Hacer: Implica ejecutar lo planificado mediante la aplicación de procedimientos, estándares de eficiencia energética y una comunicación efectiva dentro de la organización, todo orientado a optimizar y controlar el uso de la energía.
3. Verificar: Consiste en supervisar y evaluar los procesos y resultados obtenidos, comparándolos con los objetivos y políticas energéticas establecidas. Esta revisión se

apoya en auditorías y análisis por parte de la dirección, generando informes sobre lo realizado.

4. Actuar: A partir de los resultados obtenidos en la verificación, se definen nuevas acciones correctivas o de mejora para seguir perfeccionando el desempeño energético, iniciando nuevamente el ciclo con una planificación renovada.

2.2.1. Eficiencia energética

Se define como: “Utilización eficiente de un vector o recurso energético” [4]. En este caso, el bien que se produce corresponde a concentrado de cobre y las fuentes de energía son Diésel y electricidad.

Tal como lo dice la definición, la eficiencia energética se puede cuantificar por la siguiente fórmula:

$$E_e = \frac{O}{E_{req}} \quad (2.1)$$

Donde:

- E_e : Eficiencia energética-
- O: Cantidad producida
- E_{req} : Energía requerida para producir o entregar un servicio específico.

2.2.2. Requisitos de la norma ISO 50001:2018 [1]

2.2.2.a. Requisitos medulares

Son los elementos fundamentales que permiten implementar, operar y mejorar continuamente el Sistema de Gestión de Energía (SGE). Se enfocan directamente en el desempeño energético de la organización y buscan asegurar una gestión sistemática de la energía. Estos requisitos incluyen la política energética, la revisión energética, los indicadores de desempeño energético (IDE), los objetivos y metas, el control operacional, el seguimiento del desempeño y la mejora continua.

Estos son los elementos esenciales del sistema que aseguran la mejora continua del desempeño energético:

- **Política Energética:** Declaración formal del compromiso de la organización para mejorar su desempeño energético.
- **Revisión Energética:** Análisis de los usos significativos de energía (USEs), líneas base (LBEn) y variables relevantes.
- **Indicadores de Desempeño Energético (IDE):** Herramientas para medir el desempeño energético y detectar oportunidades de mejora.

- **Objetivos, Metas y Planes de Acción Energéticos:** Establecen qué se quiere lograr, cómo y en qué plazo.
- **Control Operacional:** Asegura que los procesos que afectan significativamente el desempeño energético estén controlados.
- **Seguimiento, Medición, Análisis y Evaluación del Desempeño Energético:** Para verificar si los resultados coinciden con lo planificado.
- **Mejora Continua:** Ciclo de mejora basado en el enfoque PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar).

2.2.2.b. Requisitos estructurales

Son los componentes organizativos y documentales que dan soporte al funcionamiento eficaz del SGE. No actúan directamente sobre el desempeño energético, pero crean las condiciones necesarias para que los requisitos medulares puedan aplicarse y mantenerse. Involucran aspectos como el liderazgo, las responsabilidades, la competencia del personal, la documentación, la comunicación y la auditoría interna. Estos brindan soporte al sistema y permiten que los requisitos medulares funcionen eficazmente:

- **Contexto de la Organización:** Incluye la comprensión del entorno interno y externo, y de las partes interesadas.
- **Liderazgo y Compromiso:** Participación activa de la alta dirección.
- **Roles, Responsabilidades y Autoridades:** Asignación clara dentro del sistema.
- **Competencia y Toma de Conciencia:** Formación del personal clave en temas energéticos.
- **Comunicación:** Interna y externa, eficaz y documentada.
- **Información Documentada:** Control de documentos y registros que evidencien el cumplimiento del SGE.
- **Auditoría Interna y Revisión por la Dirección:** Evaluaciones periódicas para validar la eficacia del SGE.

2.2.3. Planificación energética

Consiste en recopilar la información de consumo de energía y realizar un análisis con el fin de identificar los usos significativos de la energía y las variables que influyen. Desde este análisis se definen los controles operacionales y las actividades de seguimiento, medición y análisis de la organización.

La planificación energética debe conducir a las acciones que dan como resultado una mejora continua en el desempeño energético, y para ello responde a preguntas tales como: ¿Qué oportunidades existen para mejorar el desempeño energético? ¿Dónde se utiliza la energía? ¿Qué variables inciden en el consumo de energía? ¿Que indicadores pueden utilizarse para medir el desempeño energético?

Para poder responder a estas preguntas es necesario que la organización establezca metas energéticas que sean consistentes con la política energética. Se definen planes de acción donde se indica qué se hará, los recursos necesarios y la evaluación de los resultados incluyendo los métodos utilizados para verificar las mejoras del desempeño energético. Se establecen objetivos en las funciones y niveles pertinentes, los cuales deben ser medidos (si es factible), comunicados y ser objeto de seguimiento por los responsables.

2.2.3.a. Revisión energética

Es considerada una de las etapas más importantes de la implementación y posterior mantenimiento del sistema de gestión de la energía. La organización debe desarrollar y llevar a cabo una revisión energética donde se analice el uso y consumo de energía en las áreas de Uso Significativo de la Energía (USEs). Se debe ir actualizando en intervalos predefinidos (generalmente anuales) y como respuesta a cambios importantes que impacten en los equipos o sistemas que utilizan la energía.

La revisión inicia con una obtención y análisis de datos. En esta etapa se recopilan datos históricos de medición de energía y otras variables que afecten el desempeño energético. Se recopilan datos sobre producción, listados de equipos de consumo energético, parámetros operacionales y costos históricos a nivel general o por procesos.

Se realiza una Auditoría Energética (AE), lo cual brinda un diagnóstico energético de la organización que permite conocer el funcionamiento actual de la operación. Se pueden utilizar sus resultados como información de entrada para el estudio energético, con la finalidad de determinar los consumos de energía en las instalaciones, determinar la línea base e identificar oportunidades de mejora.

2.2.3.b. Línea de base energética

La línea de base energética (LBE) es la referencia con la que se evalúa el desempeño energético incluyendo las mejoras a la operación, observando tendencias en el tiempo y proyecciones al futuro. Debe ser establecida utilizando la información de la primera revisión energética y se define directamente como línea base el año o periodo anterior a la primera revisión.

2.2.3.c. Indicador de desempeño energético (IDE)

Estos indicadores se utilizan para verificar el desempeño energético de la organización, comparando con el determinado IDE del periodo base. Generalmente se utilizan indicadores tipo razones de valores medidos, como por ejemplo la cantidad de energía utilizada para producir una tonelada de producto (kWh/ton). Al momento de analizar el desempeño energético, debe tener en consideración eventuales distorsiones cuando se producen bajas o alzas en los niveles de producción u otras variables. En la planta concentradora de cobre de El Soldado se definen los siguientes indicadores para los procesos de molienda y flotación según [4]:

$$IDE_{molienda} = \frac{\text{Consumo eléctrico molienda (SAG + convencional)}[\text{kWh}]}{\text{Mineral procesado molienda} [\text{ton}]} \quad (2.2)$$

$$IDE_{flotacion} = \frac{\text{Consumo eléctrico flotación [kWh]}}{\text{Producción de concentrado [ton]}} \quad (2.3)$$

2.2.4. Control operacional

La organización debe planificar, implementar y controlar los procesos relacionados con la USEs necesarios para cumplir con las metas energéticas establecidas. Se define un plan de mantenimiento que apunte a reducir los consumos energéticos a medida que el equipo llegue al final de su vida útil, por lo tanto las personas responsables del mantenimiento de los equipos deben estar conscientes del impacto potencial sobre el desempeño energético. La organización es quien define e identifica los criterios destinados a mejorar el desempeño energético. Algunas de estas estrategias son las que aparecen en la figura 2.2.



Figura 2.2: Estrategias para un control operacional eficiente. Fuente: Guía implementación Norma ISO 50001:2018 [2]

2.2.5. Evaluación del desempeño: seguimiento, medición y análisis

Se encuentra ligado al apartado de control operacional, donde se define que para llevar a cabo cierta actividad de forma correcta es necesario realizar medidas y seguimiento oportuno, comparando los indicadores respecto a la línea base definida por la organización. Es importante que sea la misma organización quien defina los medios y herramientas necesarias para monitorear y analizar su desempeño energético, evaluando y documentando reportes energéticos. Los controles asociados deben tener en cuenta los aspectos de la figura 2.3



Figura 2.3: Aspectos a los cuales realizar evaluación de desempeño. Fuente: Guía implementación Norma ISO 50001:2018 [2]

La medición y el seguimiento es la base para conseguir una mejora continua. La organización debe monitorear el avance o el logro de los objetivos y metas energéticas.

2.2.6. Mejora

Hay dos tipos de mejoras: La acción correctiva y la mejora continua. En primer lugar, cuando se identifica una no conformidad, la organización debe tomar acción para controlarla y corregirla. Se debe evaluar la necesidad de tomar acciones para eliminar las causas de estos eventos y que no vuelvan a ocurrir.

Por otro lado, la mejora continua establece que la organización debe mejorar continuamente la idoneidad, adecuación y eficacia del SGE y demostrarla. La mejora del desempeño energético se puede demostrar de varias maneras, por ejemplo el progreso hacia las metas energéticas y la gestión de los USEs. Algunos ejemplos de mejora continua son:

- El consumo de energía total aumenta, pero la medida del desempeño energético mejora.
- A medida que los recursos van disminuyendo, por ejemplo en una planta de extracción de recursos, la reducción de la tasa relativa de la LBE se puede considerar una mejora del desempeño energético.

2.3. Conceptos básicos sobre armónicas en sistemas eléctricos

2.3.1. Definición de armónicos

Los armónicos eléctricos son componentes de frecuencia múltiple de la fundamental que se superponen a la señal de corriente o voltaje en un sistema eléctrico. Son generados principalmente por cargas no lineales, como variadores de frecuencia, rectificadores y equipos electrónicos. La presencia de armónicos distorsiona la forma de onda, afecta la calidad de energía, reduce el factor de potencia y puede provocar sobrecalentamiento, fallas en equipos y pérdidas adicionales en el sistema eléctrico. Por ello, su monitoreo y control son fundamentales para una operación eficiente y segura [9].

2.3.2. Origen y efectos

Las armónicas se introducen a la red por medio de la electrónica moderna- Proviene de cargas no lineales que tienen un proceso de conmutación de alta velocidad que absorben corrientes en una fracción controlada de la onda de tensión. Entre estas fuentes de armónicos se encuentran: Puentes rectificadores, cicloconvertidores, convertidores estáticos, inversores. Además, existen fuentes armónicas no convencionales tales como: Desbalance o asimetría en las tensiones, consumos con bruscas variaciones de carga, máquinas rotatorias con distribución de flujo irregular.

La presencia de armónicos en el sistema eléctrico puede generar una serie de efectos adversos en diversos equipos e instalaciones [3]. En los bancos de condensadores, se manifiestan como sobrecalentamiento, deterioro de la aislación y operación indebida de fusibles; en las protecciones, provocan falsas operaciones o fallas en su activación; en los equipos de medida, inducen errores en las lecturas; y en los transformadores, causan sobrecalentamiento, degradación del aislamiento y reducción de su vida útil. Los motores pueden presentar ruidos anómalos, vibraciones adicionales y elevación de temperatura, mientras que los conductores sufren sobrecalentamiento y pérdida de aislamiento. Finalmente, los equipos electrónicos experimentan problemas en la transmisión de datos, fluctuaciones de voltaje y parpadeo en las pantallas, comprometiendo su funcionamiento y confiabilidad.

2.3.3. Resonancia

2.3.3.a. Resonancia serie

La resonancia en serie ocurre cuando un banco de condensadores se conecta en línea con la inductancia del sistema eléctrico, como la de transformadores, líneas o motores. Esta configuración puede generar un trayecto de baja impedancia que favorece el paso de corrientes armónicas, especialmente aquellas cuya frecuencia coincide con la del circuito resonante. Como consecuencia, se pueden presentar niveles elevados de distorsión en la tensión entre el condensador y la inductancia, lo que puede sobrecargar el banco de condensadores, provocar la quema de fusibles o acelerar su deterioro. Es importante señalar que, si el banco falla, el circuito pierde su sintonía y la condición de resonancia se elimina [3]. La figura 2.4 presenta el esquema típico para la resonancia serie.

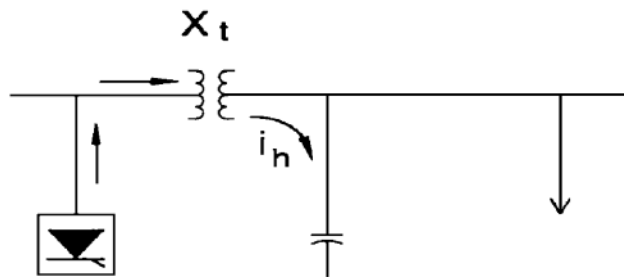


Figura 2.4: Esquema resonancia serie [3].

2.3.3.b. Resonancia paralelo

La resonancia en paralelo se produce cuando las reactancias inductiva y capacitiva del sistema se equilibran a una frecuencia específica. Si esta condición ocurre debido a la interacción entre un banco de condensadores y la inductancia del sistema, y coincide con una armónica presente en la red, se forma un circuito con alta impedancia para esa frecuencia. Esto puede provocar una significativa distorsión de la tensión en la barra de distribución y generar sobrecorrientes que afecten la estabilidad y el desempeño de los equipos conectados [3]. La figura 2.5 presenta el esquema típico para la resonancia paralelo.

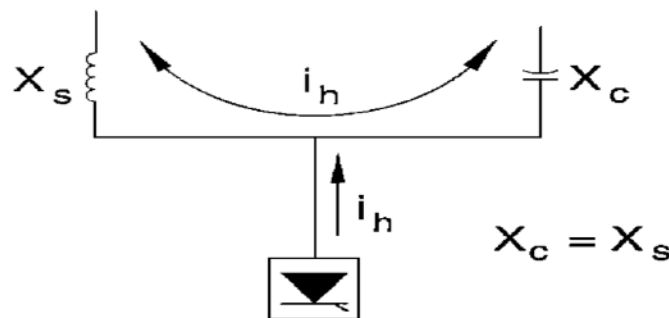


Figura 2.5: Esquema resonancia paralelo [3].

2.3.4. Distorsión armónica total

La Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en inglés) es un parámetro fundamental en el análisis de sistemas eléctricos y electrónicos, particularmente en el contexto de la calidad de la energía eléctrica. El THD se define como la relación entre el componente armónico total y el componente fundamental de una señal, lo que permite cuantificar la distorsión presente en una forma de onda.

Matemáticamente, el THD se calcula mediante la fórmula según [3]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N X_n^2}}{X_1} \quad (2.4)$$

En esta expresión, V_n representa el valor RMS (Root Mean Square, o valor cuadrático medio) de cada uno de los componentes armónicos a partir del segundo armónico hasta el N -ésimo, mientras que V_1 denota el valor RMS del componente fundamental. Esta relación proporciona un único valor que ilustra la distorsión de la forma de onda, facilitando así la evaluación cualitativa y cuantitativa de los armónicos presentes en una señal.

La importancia de la THD radica en su capacidad para servir como indicador de la calidad de la energía eléctrica. Un valor de THD elevado puede indicar un problema significativo en el sistema, que potencialmente afecta el funcionamiento de dispositivos conectados a la red eléctrica. Por lo tanto, la medición y análisis de la THD son cruciales en diversas aplicaciones, incluyendo el diseño de filtros para mitigar la distorsión, optimización de la eficiencia energética y garantía de la fiabilidad de los equipos eléctricos.

Además, la distorsión armónica de corriente también afecta de manera directa el factor de potencia de la red [3]:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cdot \cos \phi \quad (2.5)$$

En resumen, la Distorsión Armónica Total ofrece un marco práctico para comprender las complejidades de los armónicos en la forma de onda de la fuente de alimentación, consolidando su relevancia como uno de los parámetros esenciales en la evaluación de la calidad de la energía.

2.4. Métodos de reducción de armónicos

2.4.1. Filtros

En el ámbito industrial, los filtros eléctricos se emplean ampliamente para mitigar la distorsión armónica y mejorar el factor de potencia. Estos dispositivos se dividen en dos grandes categorías: pasivos y activos. Los filtros pasivos son los más comunes y se configuran generalmente para actuar sobre frecuencias específicas o como filtros de tipo pasa alto. Por otro lado, los filtros activos representan soluciones más avanzadas, capaces de adaptarse dinámicamente a las condiciones del sistema y operar en un rango más amplio de frecuencias. En esta sección se presentan las características generales de ambos tipos de filtros, sin profundizar en aspectos técnicos de diseño o funcionamiento, especialmente en lo que respecta a los filtros activos, debido a la complejidad que implica su implementación.

2.4.1.a. Filtros pasivos

Los filtros pasivos están compuestos por elementos como inductores, capacitores y resistencias, y se diseñan para ofrecer un camino de baja impedancia a ciertas frecuencias, desviando las componentes armónicas fuera del sistema. Existen varias configuraciones, como el filtro sintonizado simple, que se emplea para una armónica específica, y los filtros pasa altos de primer, segundo y tercer orden, que abarcan rangos más amplios de frecuencias. Además, estos filtros pueden aportar potencia reactiva útil a la red en condiciones normales. Entre sus principales ventajas se destacan su simplicidad y bajo costo, la capacidad de compensar potencia reactiva y su eficacia para la mitigación de armónicos específicos. Sin embargo, presentan consideraciones importantes, ya que un diseño incorrecto puede provocar resonancia paralelo, son sensibles a variaciones de temperatura, frecuencia y desgaste, deben instalarse cerca de las cargas no lineales y requieren software de análisis especializado para evitar problemas de sintonización y sobrecargas.

2.4.1.b. Filtros activos

Los filtros activos utilizan electrónica de potencia para detectar e inyectar corrientes armónicas de igual magnitud pero signo opuesto, logrando su cancelación. Operan en tiempo real y se adaptan automáticamente a las condiciones del sistema, lo que los convierte en una solución ideal para entornos dinámicos con múltiples fuentes de distorsión. Sus ventajas incluyen la capacidad de ajustarse automáticamente a las condiciones del sistema, ocupar menos espacio físico, evitar sobrecargas gracias a sus limitadores y monitorear o corregir en varios puntos simultáneamente. No obstante, presentan desventajas como un mayor costo inicial y la necesidad de dedicar más tiempo al diseño e implementación.

2.5. Normativa sobre límites de armónicas en un sistema eléctrico

Para tener un estándar de referencia de los valores de distorsión armónica en un sistema se tiene la norma IEEE 519-2022 [7], la cual genera directrices para el control de armónicos en sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales. La normativa indica que se debe realizar el análisis de distorsión armónica en el Punto Común de Conexión (PCC) que se define en el lado de alta tensión del transformador de alimentación de la planta. Este informe abarca la medición de armónicos aguas abajo del PCC oficial de la normativa, por lo tanto el estándar se adoptará como guía para asegurar la calidad interna del sistema.

2.5.0.a. Distorsión armónica total de tensión

La norma recomienda ciertos límites para el THD_v dependiendo del nivel de tensión fase-neutro al cual se encuentre operando en el punto de conexión. La tabla 2.1 muestra los valores máximos permitidos para los distintos rangos de tensión.

Tensión en el PCC	Armónico individual (%)	THD (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5 ^a

Tabla 2.1: Valores permitidos THD tensión [7].

2.5.0.b. Distorsión armónica total de corriente

Para la distorsión armónica total de corriente (THD_i) se definen 2 rangos de operación. La tabla 2.2 muestra los valores máximos permitidos para un nivel de tensión entre 120 [V] y 69 [kV]. Mientras que la tabla 2.3 se define para una operación entre 69 [kV] y 161 [kV].

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	TDD (%)
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	20,0

Tabla 2.2: Valores permitidos de distorsión de corriente armónica para tensiones entre 120 [V] y 69 [kV] [7].

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	TDD (%)
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	2,5
$20 < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	4,0
$50 < 100$	5,0	2,25	2,0	0,75	6,0
$100 < 1000$	6,0	2,75	2,5	1,0	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	10,0

Tabla 2.3: Valores permitidos THD corriente desde 69 [kV] hasta 161 [kV] [7].

Donde:

- I_{sc} : Corriente de cortocircuito máxima en el PCC.
- I_L : Corriente máxima demandada por la carga en el PCC, bajo condiciones normales de operación.

2.6. Evaluación económica

2.6.1. Valor Actual Neto (VAN)

El VAN mide la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros y la inversión inicial [10]:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0$$

donde F_t son los flujos netos de caja en el periodo t , r es la tasa de descuento e I_0 la inversión inicial. Un VAN positivo indica que el proyecto genera valor para el inversionista.

2.6.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que iguala el VAN a cero. Representa la rentabilidad esperada del proyecto y se utiliza como criterio de aceptación: si la TIR es mayor que la tasa mínima exigida, el proyecto es viable [10].

La TIR es el valor de r que satisface:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t}$$

2.6.3. Periodo de Recuperación

El periodo de recuperación corresponde al tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja generados. Aunque no considera el valor del dinero en el tiempo, es útil como indicador de liquidez y riesgo [10].

Se calcula como:

$$\text{Periodo de Recuperación} = \min \left\{ t : \sum_{i=1}^t F_i \geq I_0 \right\}$$

Donde:

- F_i : Flujo de caja en el periodo i
- I_0 : Inversión inicial

2.6.4. Vida Útil del Proyecto

La vida útil es el horizonte temporal durante el cual se espera que el proyecto genere beneficios económicos. Este parámetro condiciona el cálculo de los flujos de caja y la estimación de los indicadores financieros [10].

2.6.5. Tasa de Descuento

La tasa de descuento refleja el costo de oportunidad del capital y el riesgo asociado al proyecto. Su correcta estimación es crítica, ya que afecta directamente al VAN y a la decisión de inversión [10].

Capítulo 3

Contexto energético Operación El Soldado

3.1. Sistema de gestión de energía

3.1.1. Objetivos y metas

Durante el año 2025, el Sistema de Gestión de la Energía (SGE) de la operación El Soldado ha definido metas energéticas específicas que buscan optimizar el desempeño en áreas clave de consumo. Estas metas están alineadas con el compromiso de la compañía hacia la eficiencia energética, la sostenibilidad operacional y el cumplimiento de los estándares establecidos por la Norma ISO 50001:2018. A continuación, se enumeran las principales metas para el período:

1. Reducir el IDE de transporte en un 2 % con respecto al IDE proyectado al 2025 (sin periodos anómalos) con un Target de 0,459 lt/ton.
2. Reducir el IDE del Carguío en un 1 % con respecto al IDE proyectado al 2025 (sin periodos anómalos) con un Target de 0,164 lt/ton.
3. Reducir el IDE de molienda en un 0,3 % con respecto al IDE proyectado al 2025 (sin periodos anómalos) con un Target de 21,19 kWh/ton.
4. Lograr la operación eficaz del USE de flotación, a través del cumplimiento del IDE proyectado al 2025 +/- 10 % (sin periodos anómalos) con un Target de 6,00 kWh/ton.
5. Cumplir con el 100 % del plan de gestión para empresas externas (EPS) consumidoras de Diésel 2025.

El seguimiento mensual de los indicadores asociados a estas metas permite evaluar su cumplimiento y apoyar la toma de decisiones oportunas para asegurar su logro.

3.1.2. Certificación

La operación El Soldado de Anglo American se encuentra certificada bajo la Ley N°21.305 sobre Eficiencia Energética [8], normativa chilena que establece la obligación para los grandes consumidores de energía —aquellos con consumos superiores a 50 Tca-1/año que equivalen a 58 [GWh]— de implementar un Sistema de Gestión de la Energía (SGE) basado en la norma internacional ISO 50001:2018 [1]. Esta ley busca promover la mejora continua del desempeño energético en el sector industrial mediante el uso eficiente y responsable de los recursos. En cumplimiento de esta exigencia, El Soldado implementó un SGE que le permite identificar sus áreas de uso significativo de energía (USE), establecer Indicadores de Desempeño Energético (IDE) y definir objetivos y metas específicas de reducción del consumo. En marzo de 2024, la operación fue oficialmente certificada por un organismo acreditado, posicionándose como una de las primeras faenas mineras del país —y la primera dentro del grupo Anglo American a nivel global— en alcanzar esta validación. Este hito no solo evidencia el cumplimiento normativo, sino que también refleja el compromiso de la compañía con la sostenibilidad y la eficiencia operativa, apoyado por el uso exclusivo de energía eléctrica proveniente de fuentes 100 % renovables desde el año 2021.

3.2. Descripción de los procesos en El Soldado

La operación El Soldado, se ubica en la comuna de Nogales, región de Valparaíso a 125 kilómetros al norte de Santiago. Su producto es el concentrado de cobre que anualmente llega a 45.000 toneladas de cobre fino. La operación El Soldado inicia desde la extracción del material hasta la producción del concentrado de cobre. Se divide en 3 subprocesos: Mina El Soldado, Planta de Sulfuros y Tranque de relaves. El alcance de la memoria es la planta de sulfuros, donde se tienen principalmente los procesos de chancado, molienda y concentración.

En la figura 3.1 se observa la cadena productiva y los servicios auxiliares de la operación con las fuentes principales de consumo.

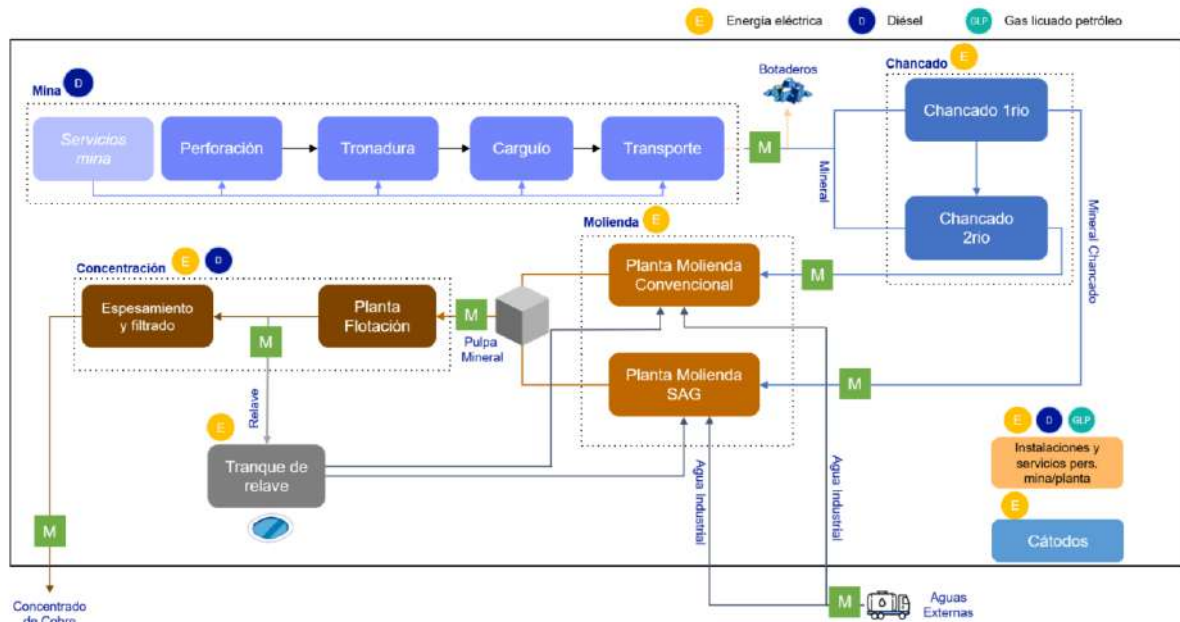


Figura 3.1: Diagrama de procesos planta. Fuente [4]

Se representan los 4 grandes procesos de la planta: Mina, Chancado, Molienda y Concentración.

- **Mina :** De este proceso es parte la extracción, carguío y transporte de mineral. Para ello se utiliza diésel como fuente de energía.
- **Chancado:** Los camiones de extracción (CAEX) llevan el material al chancado para reducir el tamaño del mineral y se utilizan equipos con motores eléctricos.
- **Molienda:** Con la finalidad de moler el mineral se utiliza principalmente energía eléctrica. De este proceso se obtiene la pulpa mineral que alimenta el proceso de flotación.
- **Concentración:** En esta etapa se encuentran las operaciones de Flotación y espesamiento-filtrado. Se utiliza energía eléctrica.

3.3. Consumos energéticos

La energía utilizada en la operación de El Soldado viene principalmente de 2 fuentes energéticas: Diésel y Electricidad. La figura 3.2 muestra la proporción entre ambas fuentes de energía, donde se tiene un 52,31 % de energía eléctrica y un 47,61 % de Diésel. El gas licuado se utiliza en zonas administrativas y representa el 0,08 % restante.

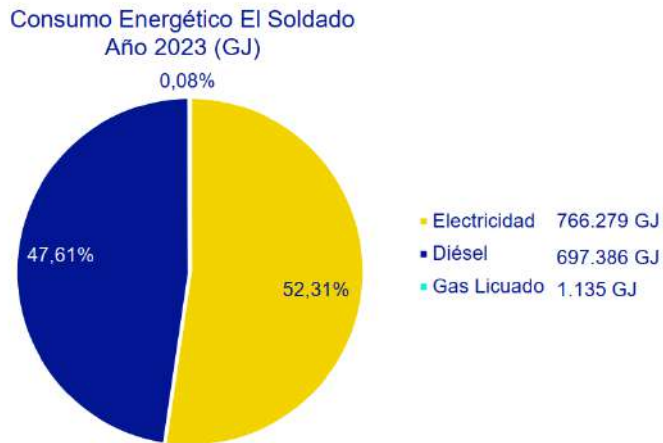


Figura 3.2: Distribución consumos energéticos. Revisión energética 2024 [4]

La fuente de energía de la planta de Sulfuros es la electricidad, es por eso que la memoria se realizará en este contexto. La figura 3.3 muestra la distribución de los consumos eléctricos en la operación. Se observa que el proceso de Molienda SAG se lleva un 42,94 % del consumo eléctrico total, flotación un 15,68 % y molienda convencional un 19,41 %. Estas representan el 78 % del consumo eléctrico total y son las áreas en las cuales se centrará el estudio de la memoria.

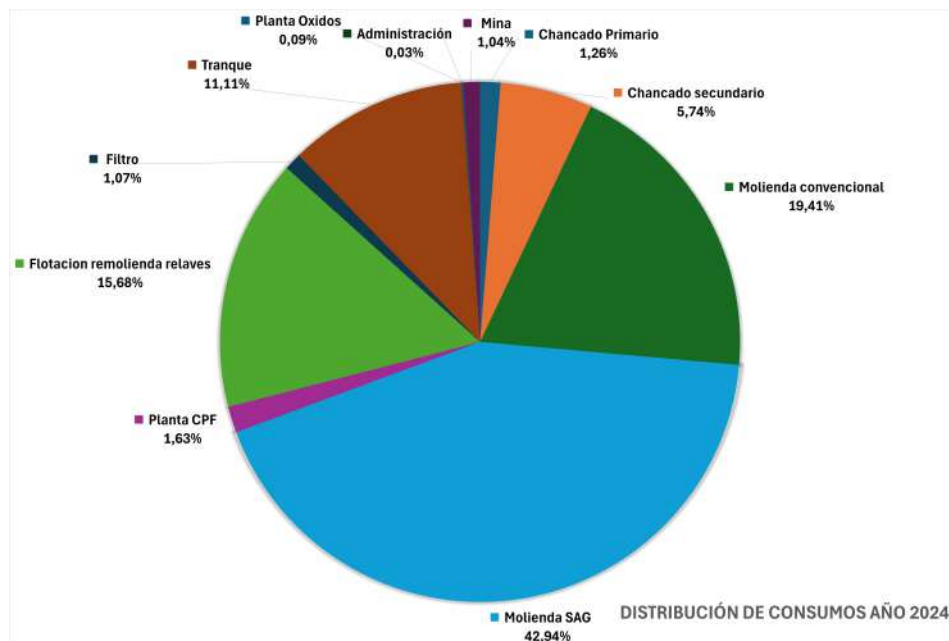


Figura 3.3: Distribución de los consumos energéticos El Soldado año 2024.

3.3.1. Molienda SAG

Este proceso representa alrededor del 40 % del consumo eléctrico total de la operación El Soldado. Cuenta con un molino SAG accionado por medio de dos motores sincrónicos de 6250 [HP] cada uno. Existe un equipo llamado Quadramatic que realiza un control automático para equilibrar la carga entre ambos motores. La figura 3.4 muestra un resumen de los equipos principales del proceso, donde se tiene la alimentación de material en la correa 3003, y la descarga de sólidos en la correa 3001 y 3002, mientras que la descarga de pulpa mineral va por medio de tuberías impulsadas por la bomba de hidrociclones.

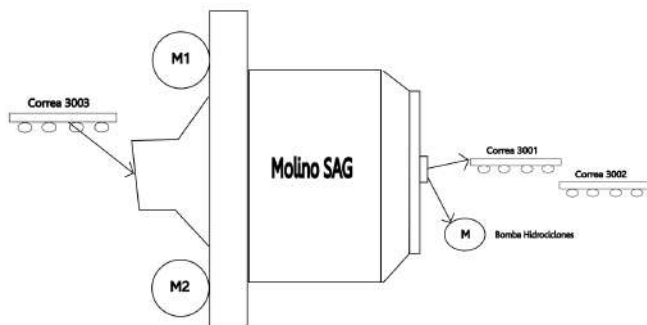


Figura 3.4: Esquema resumen Molienda SAG.

La tabla 3.1 muestra los consumos eléctricos de este proceso en el 2025.

Equipo	Consumos [kWh]				
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Motores molino SAG	8.226.617	6.409.202	4.995.943	6.940.383	7.727.155
Otros consumos	445.300	640.756	544.498	646.385	626.758
Total	8.671.917	7.049.958	5.540.441	7.586.768	8.353.913

Tabla 3.1: Distribución de los consumos energéticos Molienda SAG año 2025.

Para entender como se distribuyen estos consumos se realiza el gráfico de la figura 3.5 donde se observa que el 92 % del consumo eléctrico es por los motores del molino SAG.

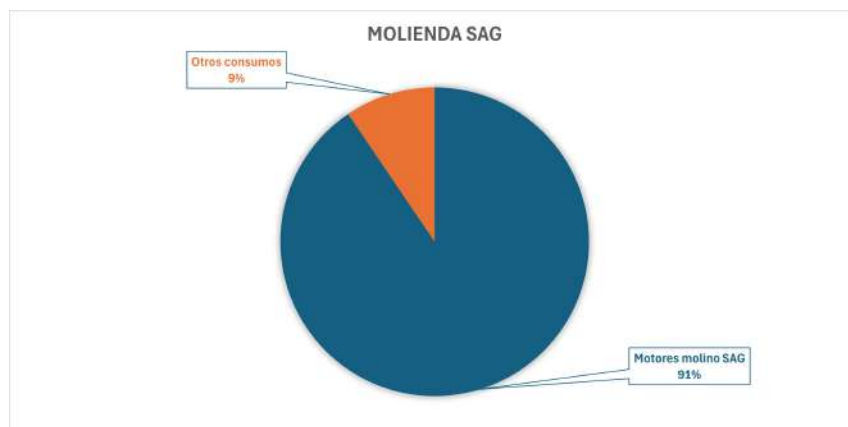


Figura 3.5: Proporción consumos eléctricos Molienda SAG, año 2024.

3.3.2. Molienda convencional

En este proceso existen cuatro secciones, las cuales tienen motores asincrónicos con partida directa y un nivel de tensión de 400 [V]: La sección 1 que tiene al molino 1 con un motor de 737 [HP], el molino 2 de 500 [HP] y el molino 3 de 750 [HP]. La sección 2 con el molino 4 de 650 [HP], el molino 5 de 750 [HP] y el molino 6 de 500 [HP]. La sección 3 que corresponde al molino 8 y 9, con una potencia de 737 [HP] Y 476 [HP], respectivamente. La sección 4 que tiene al molino 10 con una potencia de 737 [HP] y al molino 11 con una potencia de 476 [HP]. Finalmente el molino de 2000 que trabaja en conjunto con la sección 4 y es un motor sincrónico de 2000 [HP] en 4,16 [kV].

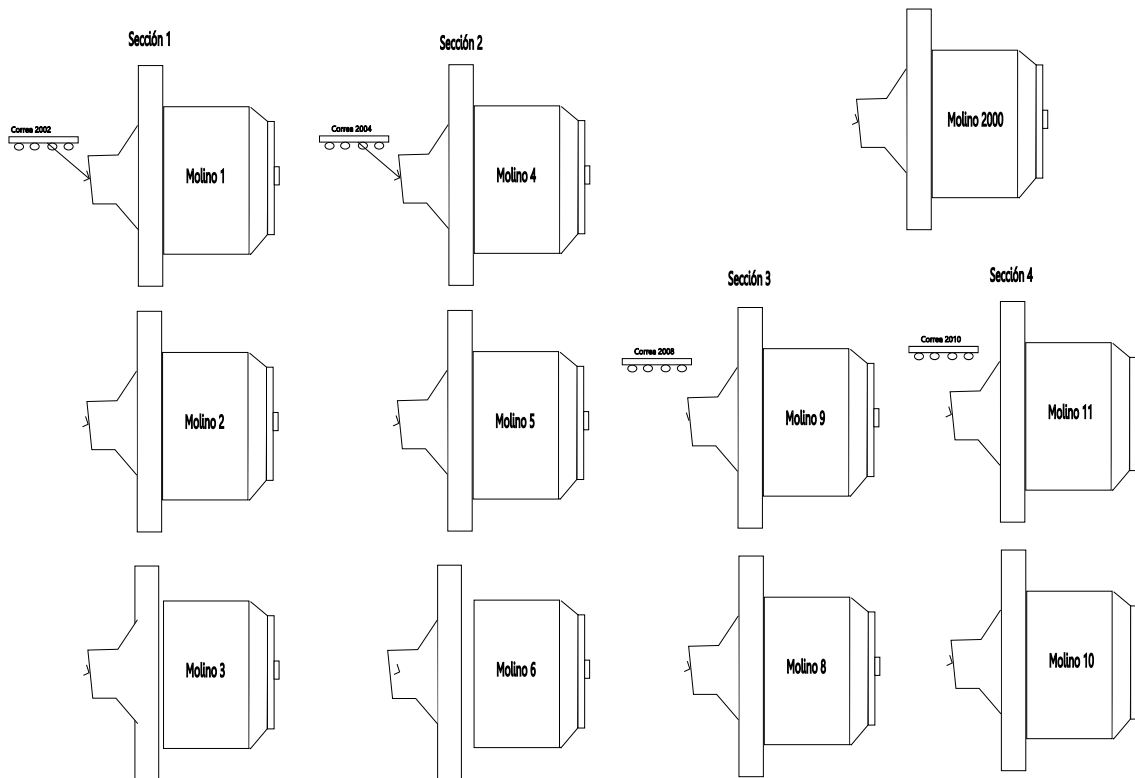


Figura 3.6: Esquema resumen Molienda Convencional.

La figura 3.6 representa de forma simple las secciones de molienda convencional. Se observa que la correa 2002 alimenta el molino 1 de la sección 1. Esta alimentación es el material procesado por la sección completa, dado que esta se va distribuye por el resto de los molinos. La correa 2004 alimenta al molino 4, y corresponde al material procesado por la sección 2. La sección 3 es alimentada por la correa 2008, y la sección 4 por la correa 2010. En cada sección hay bombas hidrociclones para los flujos de descarga y recirculación, además de otros equipos de lubricación y auxiliares.

La tabla 3.2 muestra los consumos de los primeros meses del año 2025 de forma distribuida por cada equipo.

Equipo	Consumos [kWh]				
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Molino 1	187.009	207.159	169.051	257.588	284.890
Molino 2	114.405	138.448	117.120	156.968	170.739
Molino 3	181.875	207.159	175.680	245.513	267.328
Molino 4	214.877	149.729	153.582	196.210	208.789
Molino 5	278.679	214.337	193.359	280.731	292.695
Molino 6	181.875	129.218	133.694	170.048	182.447
Molino 2000	1.112.518	869.656	794.427	1.039.407	1.102.486
Molino 8	239.078	291.253	262.968	320.979	323.916
Molino 9	162.807	194.852	176.785	206.272	229.278
Molino 10	296.280	210.235	246.394	310.917	305.379
Molino 11	161.341	410.215	187.834	241.489	224.400
Otros consumos	420.777	313.876	456.779	530.379	405.802
Total	3.551.521	3.336.137	3.067.673	3.956.501	3.998.149

Tabla 3.2: Distribución de los consumos energéticos Molienda Convencional año 2025.

Para observar como se reparten el consumo eléctrico se realizó el gráfico de la figura 3.7, donde se observa que el 31 % del consumo se lo lleva el molino 2000. La sección 1 consume un 18 %, sección 2 un 8 %, la sección 3 un 15 % y la sección 4 un 15 %.

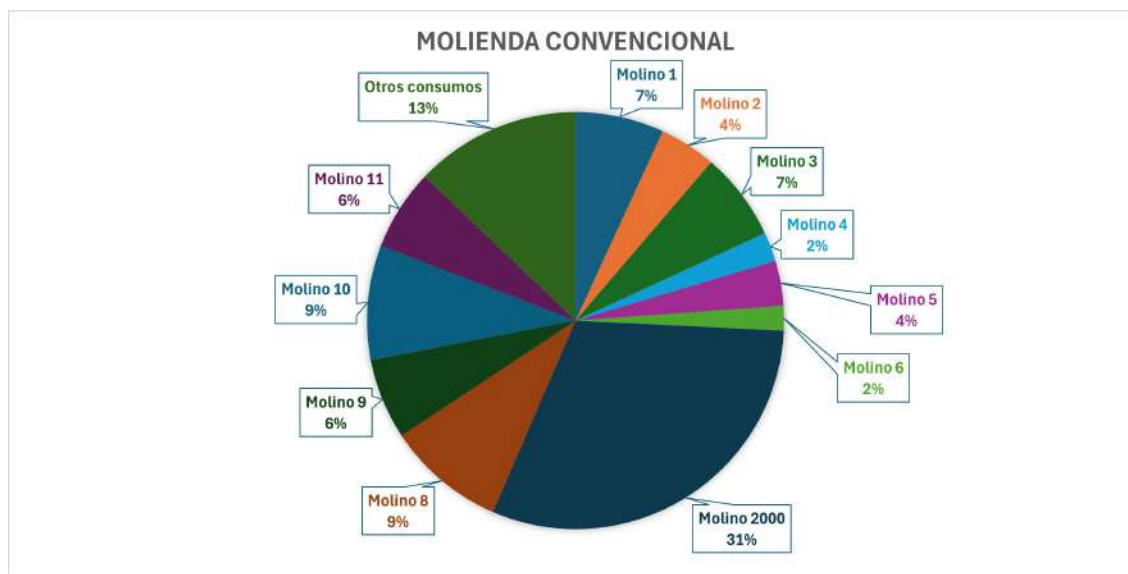


Figura 3.7: Proporción consumos eléctricos Molienda Convencional, año 2024.

3.3.3. Flotación

Este proceso consume alrededor del 16% de la energía eléctrica de la operación. La finalidad de este proceso es separar selectivamente el cobre de otros minerales e impurezas presentes en la pulpa mineral.

La figura 3.8 muestra las celdas de flotación Wenco 1500 que tiene las filas A, B y C. La fila A y B cuenta con 9 motores asincrónicos de 100 [HP] cada una. Mientras que la fila C son 10 motores de 100 [HP] y 2 de 75 [HP]. Por otro lado, las celdas Wenco 1000 son 10 motores asincrónicos de 75 [HP] cada uno.

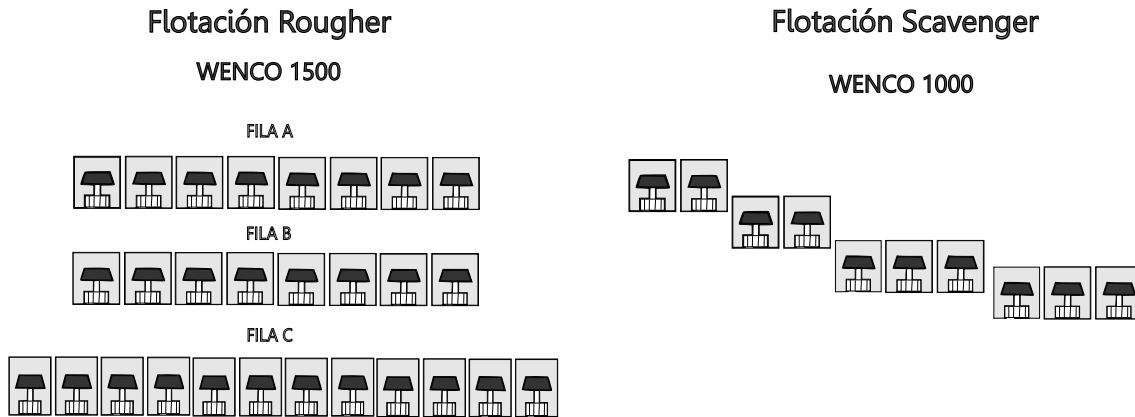


Figura 3.8: Esquema resumen Celdas de flotación Wenco 1500 y 1000.

Se presenta la tabla 3.3 con los consumos eléctricos de los principales equipos del proceso de flotación.

Equipo	Consumos [kWh]				
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Flotacion arenas	474.884	1.118.349	769.854	958.790	1.018.687
Celdas de flotacion	868.243	1.441.502	1.294.794	1.456.142	1.792.950
Molinos remolienda	239.811	280.997	250.814	306.892	320.014
Bombas flotacion y otros	30.977	34.089	46.804	21.855	40.743
Bombas relave final	547.356	496.463	498.246	654.454	684.702
Total	2.161.271	3.371.400	2.860.512	3.398.133	3.857.096

Tabla 3.3: Distribución de los consumos energéticos Flotación año 2025.

Tal como se muestra en la figura 3.9 las celdas de flotación representan un 33 % del consumo eléctrico del proceso. El molino 7 que es de remolienda tiene un 11 %, y flotación arenas un 32 %.

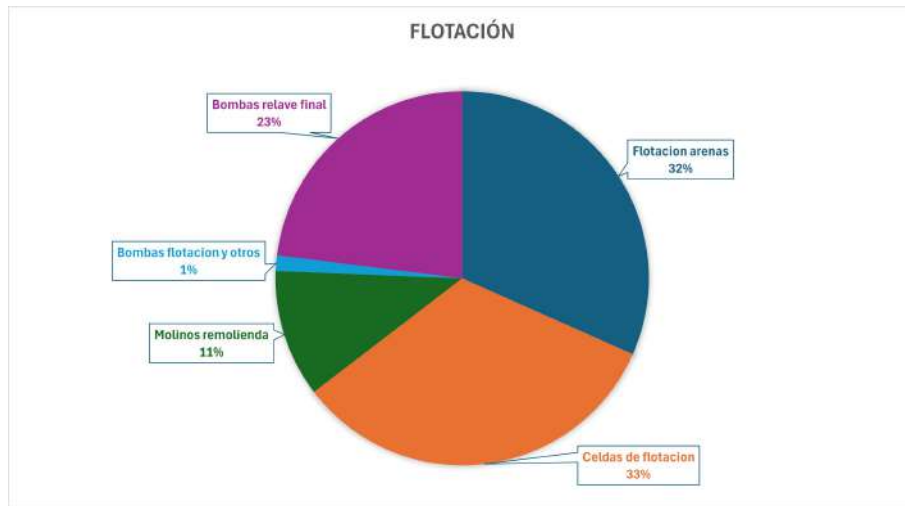


Figura 3.9: Proporción consumos eléctricos Flotación, año 2024.

3.3.4. Tranque de relaves

El tranque de relaves corresponde al depósito para almacenar los residuos del proceso completo. Es una mezcla de rocas, agua y un porcentaje del mineral procesado. Hacia acá son enviados por medio de bombas de impulsión que depositan el relave en el tranque.

Agua Fresca - Bombas Melón

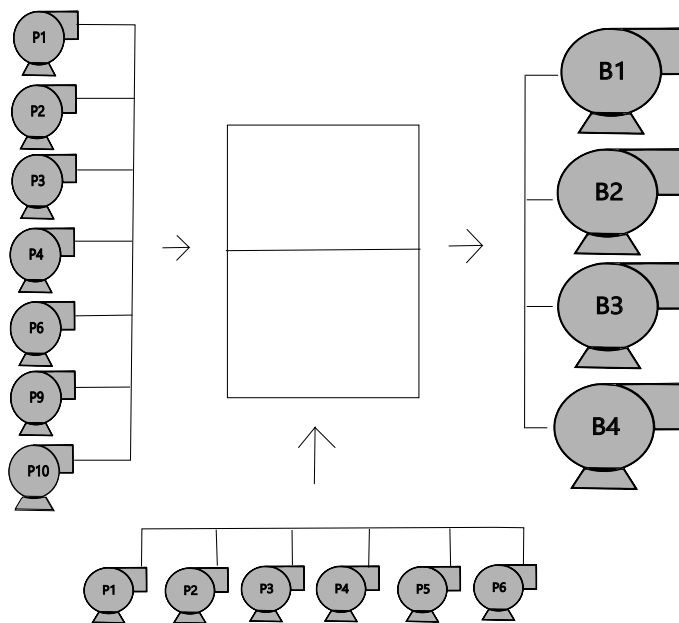


Figura 3.10: Esquema resumen Agua fresca Tranque de relaves.

Luego hay un sistema de recuperación de aguas que corresponde al equipo agua industrial que se obtiene desde el relaves y se envía hacia la operación por medio de bombas. También hay un equipo llamado agua fresca, la cual es agua que se obtiene desde pozos ubicados en ciertos puntos que sirve para consumo humano y operación. La figura 3.10 muestra un esquema resumen de agua fresca.

La tabla 3.4 presenta el valor del consumo eléctrico mensual del año 2025 para cada equipo del proceso de Tranque.

Equipo	Consumos [kWh]				
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Relaves	1.303.508	831.178	822.437	974.829	1.124.106
Agua industrial	660.448	814.810	720.012	925.888	877.930
Agua fresca	326.348	371.245	356.885	376.320	444.897
Total	2.290.304	2.017.233	1.899.334	2.277.037	2.446.933

Tabla 3.4: Distribución de los consumos energéticos Tranque año 2025.

De la figura 3.11 se obtiene que un 39 % del consumo eléctrico del proceso tranque lo realizan las bombas de relaves, mientras que el resto se reparte en un 20 % de agua fresca y un 41 % de agua industrial.

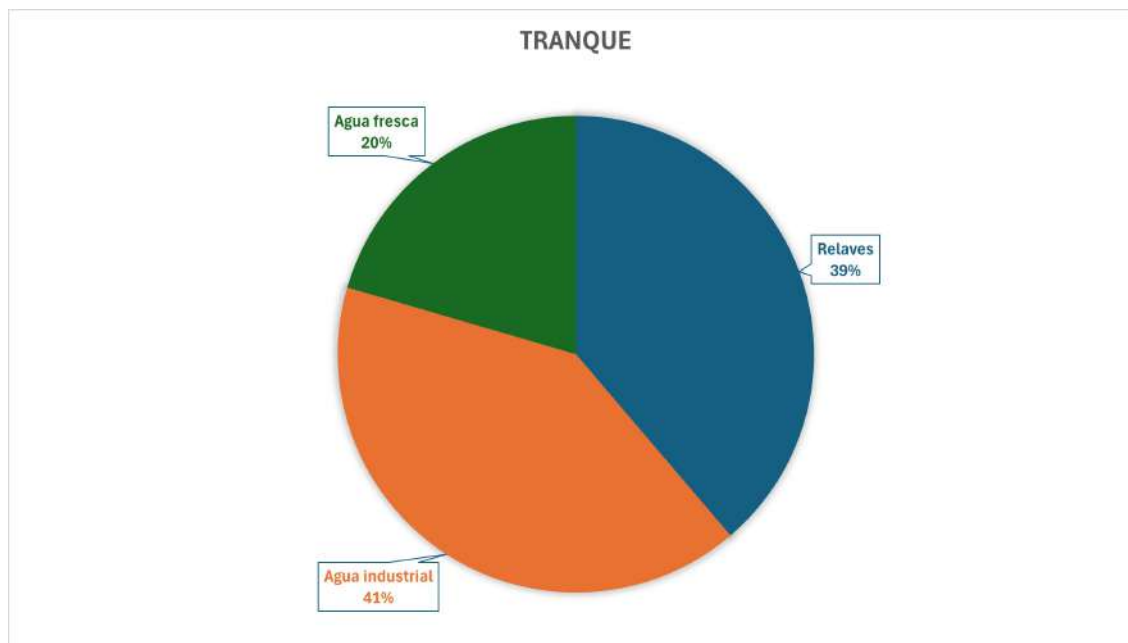


Figura 3.11: Proporción consumos eléctricos Tranque, año 2024.

Capítulo 4

Estudio Calidad de Energía y levantamiento de equipos en la planta

Este capítulo presenta el diagnóstico de calidad de energía en la planta El Soldado, evaluando distorsión armónica, factor de potencia y niveles de carga en los centros de distribución. Además, se incluye el levantamiento de equipos eléctricos para asociar consumos específicos y detectar ineficiencias. Los resultados permiten cumplir con la Ley 21.305 [8] y la Norma ISO 50001:2018 [1], y sirven como base para las propuestas de mejora desarrolladas en capítulos posteriores.

4.1. Sistema de estudio

Se analizarán distintos puntos de conexión y alimentación que tiene la planta de El Soldado en sus diferentes niveles de tensión. Particularmente, se hará énfasis en la barra **B**, que opera a un nivel de tensión de 110[kV] y que conecta la línea de transmisión desde el distribuidor ubicado en La Calera. Además, esta barra alimenta dos transformadores de 36[MVA], de los cuales uno se encuentra en funcionamiento permanente y el otro en estado de reserva (*stand-by*). Los transformadores poseen una salida en 12,5[kV] que alimenta la barra **C**, y otra salida en 4,16[kV] que alimenta la barra **D**. El objetivo de esta sección es analizar la calidad de energía en los distintos puntos de la planta, comenzando por una visión general de las condiciones presentes en las barras que conectan los transformadores: B, C y D. A partir de esta base se desciende en la jerarquía eléctrica hacia los Centros de Distribución (CD), luego a los Centros de Control de Motores (CCM), y finalmente se abordan los aspectos más específicos relacionados con el comportamiento de los equipos individuales. La figura 4.1 representa de manera simplificada la distribución de las barras que se analizan en este documento. La barra A está ubicada en la Subestación de La Calera con un nivel de tensión de 110 [kV], ésta alimenta la planta mediante una línea de transmisión que llega a la barra B. Luego se distribuye por el transformador principal hacia las barras C y D. En la Barra C se tienen principalmente las cargas de : Molienda convencional, Flotación, tranque y Mina. Mientras que en la barra D se encuentran cargas tales como: Molienda SAG Y Chancador.

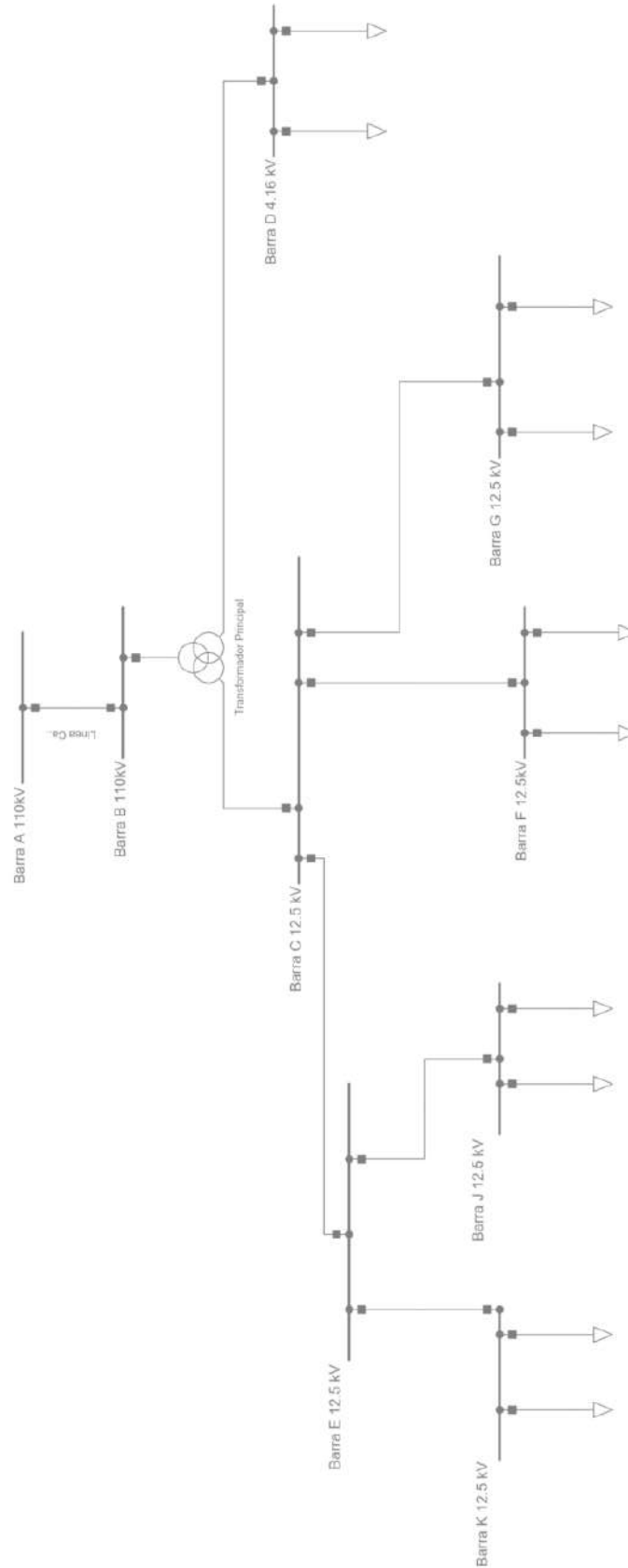


Figura 4.1: Diagrama unilineal simplificado.

4.1.1. Equipos utilizados

4.1.1.a. Medidor PowerLogic ION9000

El medidor PowerLogic ION9000 de Schneider Electric es un equipo de clase mundial diseñado para aplicaciones críticas que requieren alta precisión y análisis avanzado de la calidad de la energía. Este dispositivo cumple con la norma IEC 62053-22 [11], certificándolo como clase 0.1S para la medición de energía activa, lo que garantiza una precisión superior en comparación con los medidores tradicionales. Además, cumple con la norma IEC 61000-4-30 Clase A [12], lo que lo habilita para realizar mediciones de calidad de energía conforme a los estándares más exigentes a nivel internacional, asegurando la validez de los datos en auditorías, diagnósticos y reportes regulatorios.

El ION9000 también integra capacidades avanzadas de detección y análisis de perturbaciones, capturando transitorios de hasta 100 [ns] con una resolución extremadamente alta, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma IEC 62586-2 [13]. Estas funcionalidades, junto con su arquitectura modular y ciberseguridad incorporada (compatibilidad con protocolos como HTTPS, SFTP y Syslog), lo convierten en una herramienta esencial para sistemas eléctricos industriales, centros de datos y plantas donde la confiabilidad y la trazabilidad de las mediciones son fundamentales. Además, su compatibilidad con la plataforma EcoStruxure permite una integración fluida con sistemas SCADA y de gestión energética.

4.1.1.b. Medidor Sferre 720

El medidor Sferre 720 de Elecnova es un dispositivo trifásico de medición multifuncional con capacidades avanzadas de análisis de calidad de energía. Cuenta con pantalla TFT de 3,5 [pulgadas] a color, botones táctiles y diseño modular que permiten configurar hasta 17 módulos externos para expansión en comunicación (RS-485, Modbus-RTU, Ethernet, Wi-Fi) o E/S analógicas y digitales. Su precisión es de 0.2 % en tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, conforme a la norma IEC 62053-22 clase 0.2S [11], adecuada para aplicaciones industriales y de registro de tarifas.

Además, el Sferre 720 es capaz de medir armónicos (hasta el 63° orden), desequilibrio, demanda máxima/mínima, frecuencia (± 0.01 [Hz]) y almacena datos históricos por hasta tres años, convirtiéndolo en una herramienta eficiente para la monitorización prolongada de sistemas energéticos. Está certificado bajo normas de seguridad y EMC (IEC 61010-1 [14], EN 61326-1 [15], EN 61000-3-2/3) [16] y protegido contra polvo y agua con grado IP64 frontal, lo que garantiza su funcionamiento confiable en ambientes industriales exigentes.

4.1.1.c. Fluke 1732

El Fluke 1732 es un analizador de redes trifásico portátil, diseñado para realizar estudios de carga y eficiencia energética en sistemas eléctricos de baja y media tensión. Este equipo permite registrar parámetros fundamentales como tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, energía, factor de potencia, armónicos y otros indicadores clave para diagnósticos energéticos. Cuenta con una interfaz gráfica intuitiva mediante pantalla a color de 4,3" y botones táctiles, lo que facilita su configuración y visualización de datos en campo. Puede alimentarse directamente desde la red medida (hasta 500 [V]) o mediante adaptador externo, y dispone de entradas para tres fases y neutro.

En cuanto a precisión, el Fluke 1732 cumple con la norma IEC 61010-1 [14] en materia de seguridad eléctrica, y con EN 61326-1 [15] para compatibilidad electromagnética. Presenta una precisión de medición de tensión de $\pm(0,2\% + 0,01\%)$ y en frecuencia de $\pm 0,1\%$, operando en un rango de 42,5 [Hz] a 69 [Hz]. La frecuencia de muestreo es de 10,24 [kHz], con actualización de valores RMS cada medio ciclo, lo que lo hace apto para capturar variaciones rápidas en el sistema. Posee una memoria interna capaz de registrar múltiples sesiones de hasta 8 semanas cada una, incluyendo eventos, tendencias y armónicos hasta el orden 50. Su categoría de seguridad es CAT IV 600V y CAT III 1000V, lo que permite su uso en puntos de entrada del sistema eléctrico.

4.2. Mediciones

4.2.1. Barra B

Esta barra tiene un nivel de tensión de 110 [kV] y alimenta los transformadores principales de la planta. Ambos transformadores tienen una potencia nominal de 36 [MVA] con doble núcleo y salidas de 12,5[kV] y 4,16 [kV], con potencias de 25 [MVA] Y 16 [MVA], respectivamente. La figura 4.2 presenta una sección del diagrama unilineal de la planta, donde se observa la barra A que corresponde a la subestación eléctrica Calera de donde se provee la energía y la barra B ubicada en la subestacion El Cobre que se encuentra en las instalaciones de Anglo American El Soldado.

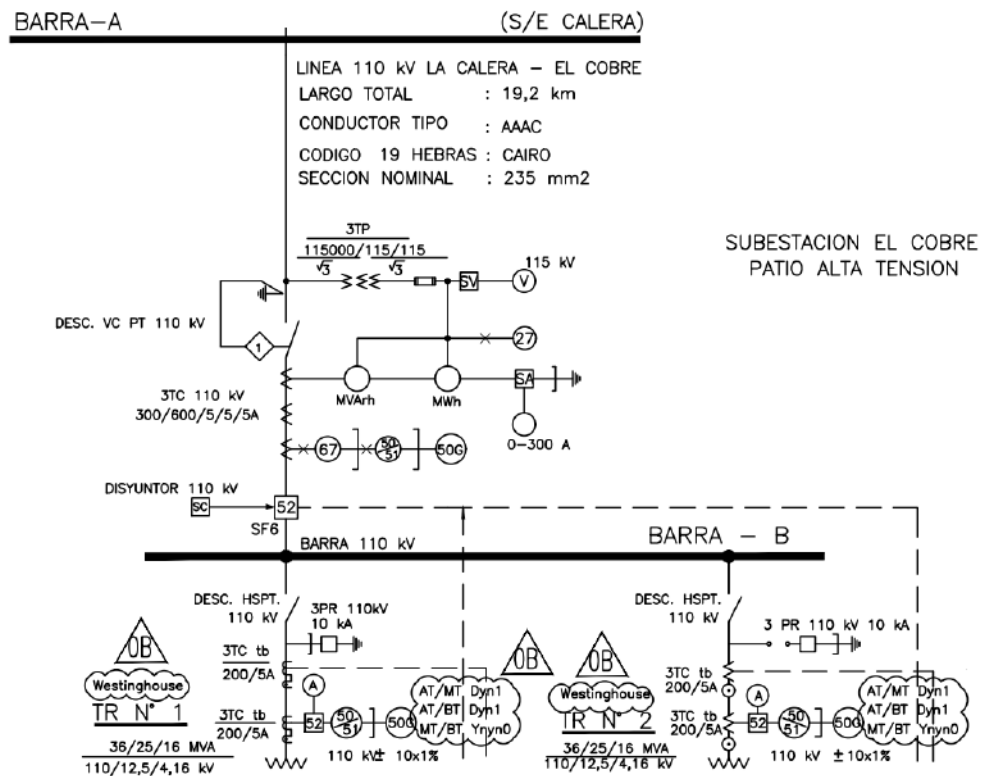


Figura 4.2: Equipos alimentados por la barra B [5]

4.2.1.a. Potencias y factor de potencia en operación normal

La figura 4.3 muestra las potencias medidas por el equipo ION 9000 instalado en esta barra. Se observa una potencia máxima de 31,26 [MVA]. Además, se observa que en luego del día 3 de junio hay una disminución en los consumos debido a la mantención del molino SAG, el cual es una de las principales cargas de la planta.

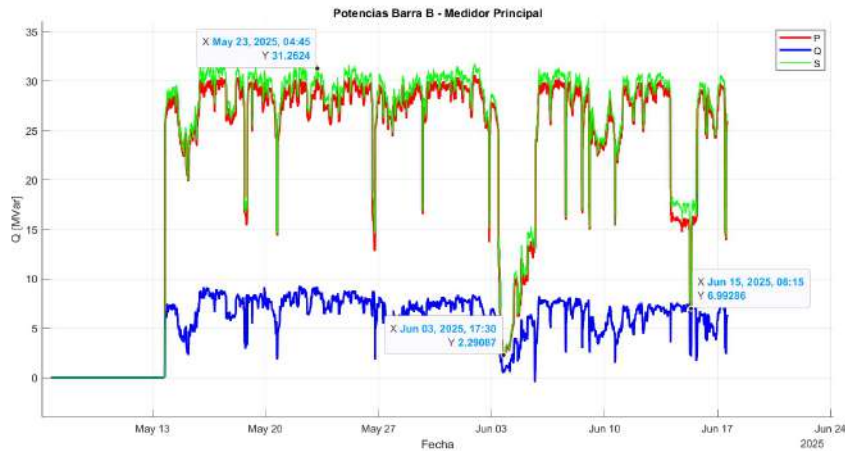


Figura 4.3: Potencias barra B

Se analiza el comportamiento del factor de potencia que tiene la operación de la planta tal como se muestra en la figura 4.4. Se observa que hay puntos en los que el factor de potencia disminuye llegando incluso a valores cercanos a 0,87 tal como se presenta en la tabla 4.1. Este punto ocurre cuando el molino SAG se encuentra en mantención. Más adelante se comentará acerca de esta situación.

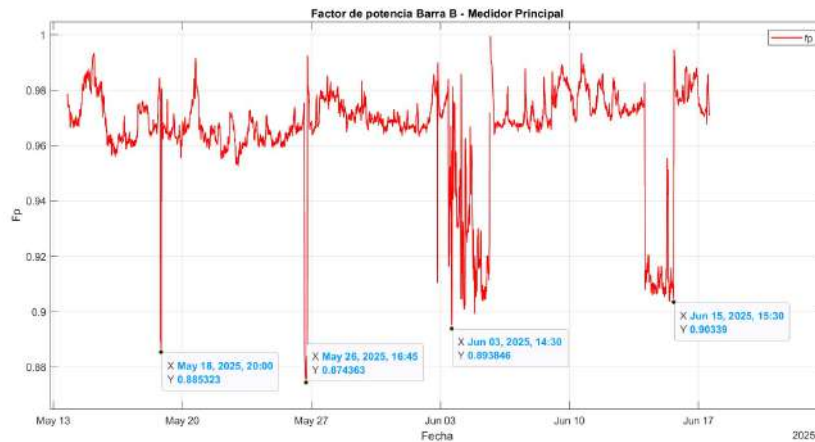


Figura 4.4: Factor de potencia barra B

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,8744	0,965	0,9994

Tabla 4.1: Factor de potencia Barra B.

4.2.1.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

Continuando con el estudio de calidad de energía en la barra B se observa en la figura 4.5 que el THD de la corriente se mantiene normalmente en un valor cercano al 2%. Sin embargo, también se ve una alteración el día en que el molino SAG entra en mantención.

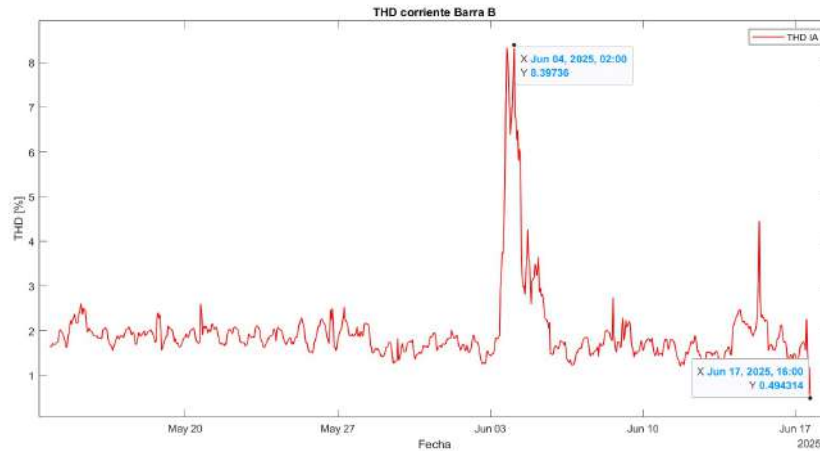


Figura 4.5: Distorsión armónica de corriente barra B

En este caso se presenta la distorsión armónica en la tensión de la fase A de la barra B. Se observa en la figura 4.6 que el THD alcanza un valor máximo de 1,1%. La tabla 4.2 presenta el valor mínimo, promedio y máximo tanto de la distorsión armónica de corriente como de tensión.

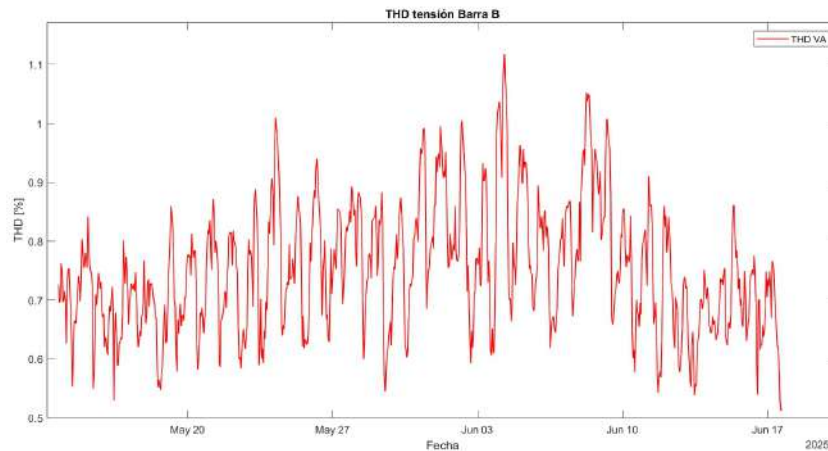


Figura 4.6: Distorsión armónica de tensión barra B

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	0,49	1,96	8,39
THD tensión [%]	0,51	0,75	1,12

Tabla 4.2: Distorsión armónica Barra B.

4.2.1.c. Operación con Molino SAG detenido.

Se realiza un acercamiento al gráfico 4.3 en torno al día 3 de junio donde se realizó una mantención mayor al molino SAG. Se observa en la figura 4.7 que la potencia aparente (S) llega a un valor de 2,36 [MVA], mientras que la potencia reactiva (Q) tiene un valor mínimo de 0,746 [Mvar]. Se puede concluir que las cargas que estaban funcionando en ese momento eran muy bajas respecto al funcionamiento normal.

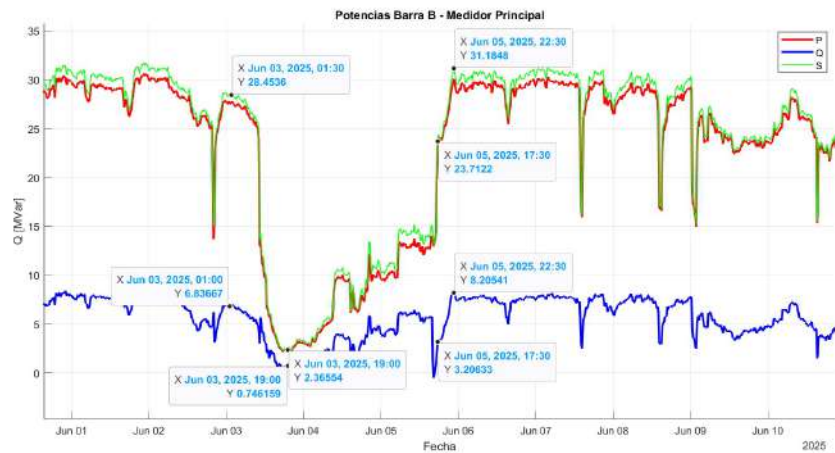


Figura 4.7: Potencias barra B salida SAG

En la figura 4.8 se realiza un acercamiento al gráfico de la figura 4.5, donde se observa que el THD de la corriente llega a un valor del 8% muy superior a lo que se tiene cuando la planta tiene una operación normal.

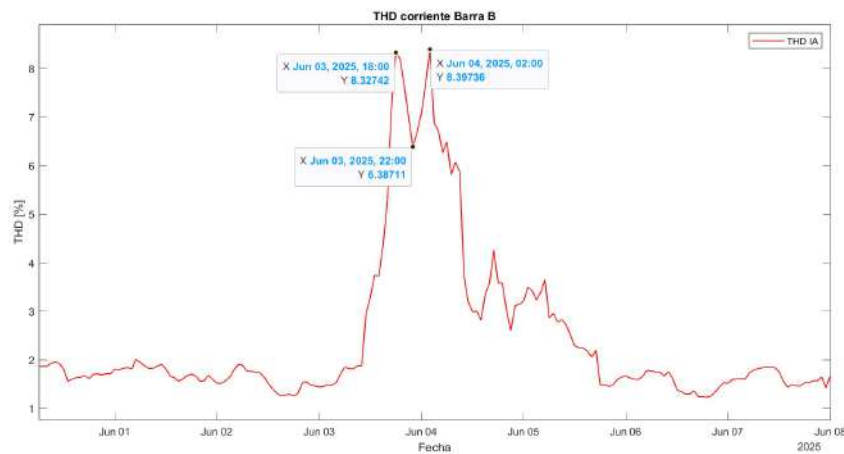


Figura 4.8: Distorsión armónica de corriente barra B salida SAG

4.2.2. Barra C

Esta barra tiene un nivel de tensión de 12,5[kV], y es alimentada directamente desde la salida del transformador principal de la S/E con una potencia nominal de 16 [MVA]. Desde esta barra se alimenta, principalmente, la molienda convencional, flotación, mina, chancador secundario y tranque.

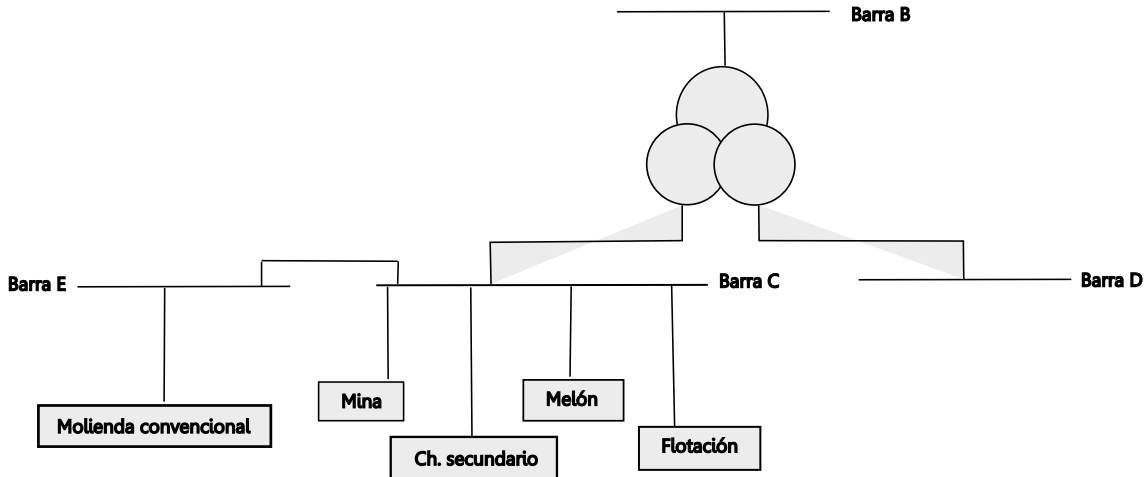


Figura 4.9: Esquema Barra C.

La figura 4.9 muestra de forma simplificada la configuración que tiene el sistema de estudio. La barra B se analizó en la sección anterior y corresponde al punto de conexión con la distribuidora de energía. El transformador tiene 2 salidas: una en 4,16 [kV] que alimenta la barra D y otra en 12,5 [kV] que llega a la barra C. La barra E es una extensión de la barra C en el mismo nivel de tensión.

El chancado secundario es el proceso de reducción de tamaño del mineral que ya pasó por el proceso de chancado en el primario. En este caso se divide en la sección 1 con un motor principal de 500 [kW] y la sección 2 con un motor de 600 [kW].

Molienda convencional cuenta con 11 molinos distribuidos por 4 secciones. El molino 2000 se encuentra tomado desde la barra D por lo tanto no entra en este análisis.

Flotación cuenta con celdas distribuidas tanto en la barra C como en la E. La mina tiene un consumo relativamente bajo en torno al 1% del consumo eléctrico total, dado que sus equipos principales utilizan Diesel para funcionar.

4.2.2.a. Potencias y factor de potencia

La potencia de esta barra, la como se muestra en la figura 4.10, varía entre 13 [MVA] y 22 [MVA] dependiendo de los equipos que se encuentren operando.

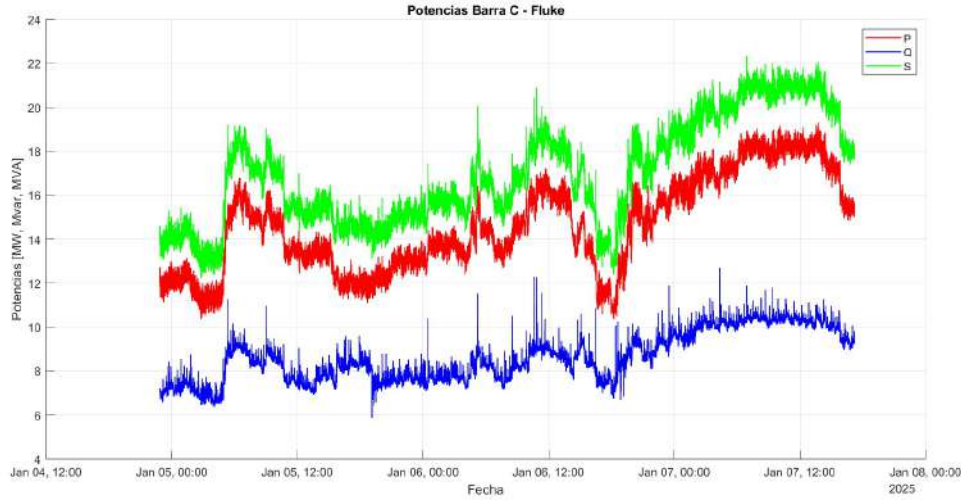


Figura 4.10: Potencias barra C.

El factor de potencia se mantiene valores relativamente bajos llegando a valores incluso de 0,753 como se presenta en la figura 4.11. El factor de potencia promedio se registra en la tabla 4.3 con un valor de 0,8625.

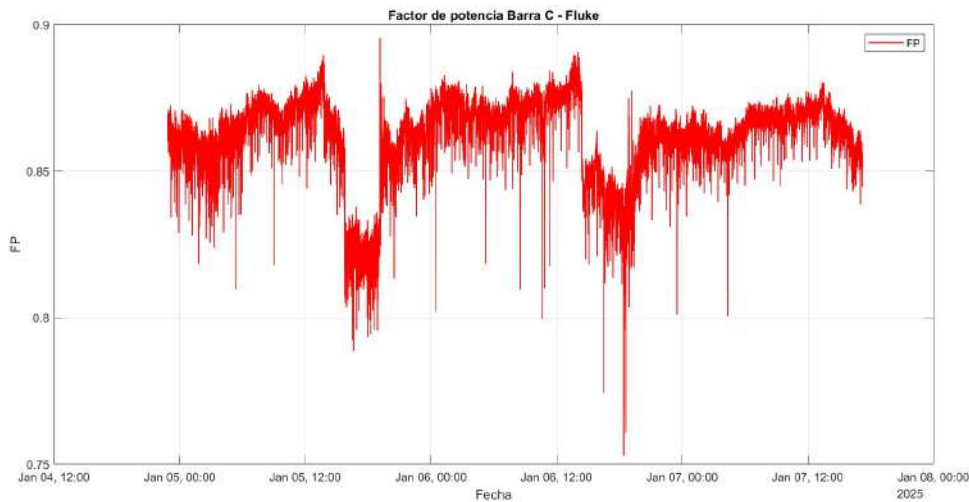


Figura 4.11: Factor de potencia barra C

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,753	0,8625	0,8954

Tabla 4.3: Factor de potencia Barra C.

4.2.2.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

La distorsión armónica total de esta barra se observa en la figura 4.12, donde se alcanzan valores máximos de 5,16 [%], y con un THD promedio de 3,4 %.

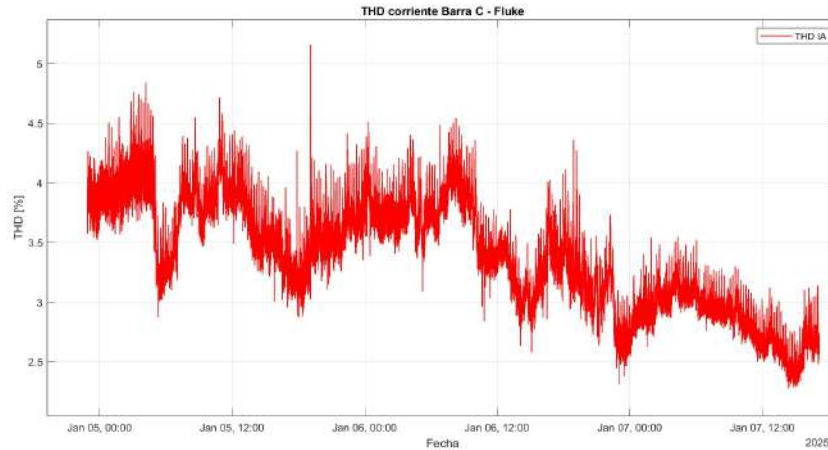


Figura 4.12: Distorsión armónica de corriente barra C

En este caso se observan picos de la distorsión armónica de tensión con magnitud igual a 1,18 [%] en su gráfico de la figura 4.13. La tabla 4.4 registra los valores mínimo, promedio y máximo de la distorsión armónica de tensión y corriente.

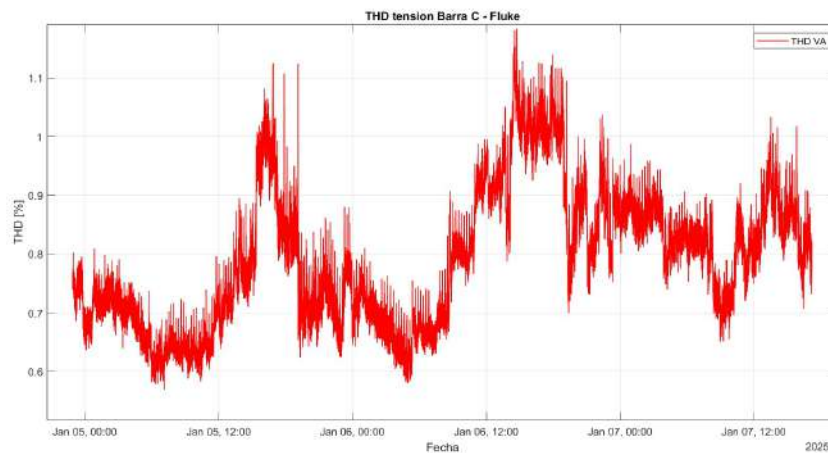


Figura 4.13: Distorsión armónica de tensión barra C

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	2,28	3,40	5,16
THD tensión [%]	0,57	0,79	1,18

Tabla 4.4: Distorsión armónica Barra C.

4.2.3. Barra D

Esta barra tiene un nivel de tensión de 4,16 kV y es una de las salidas directas del transformador principal de la S/E El Cobre. Desde la barra se suministra energía a equipos de alta potencia que requieren alimentación en media tensión, los cuales se detallan en la tabla 4.5.

Equipo	Ubicación	Potencia [HP]
Chancador Primario	CCM 102	400
Molino 2000	CCM 308	2000
Motor 1 Molino SAG	CCM 200	6250
Motor 2 Molino SAG	CCM 200	6250
Compresor SAG	CCM 914	600
Compresor Filtrado	CCM 914	600

Tabla 4.5: Equipos alimentados Barra D.

4.2.3.a. Potencias

La medición de esta barra se realizó incluyendo una mantención mayor del molino SAG (carga principal de esta barra). Esto se refleja en la caída de la demanda que se observa en la figura 4.14. Se tiene además que el consumo promedio se encuentra en torno a los 12 [MW].

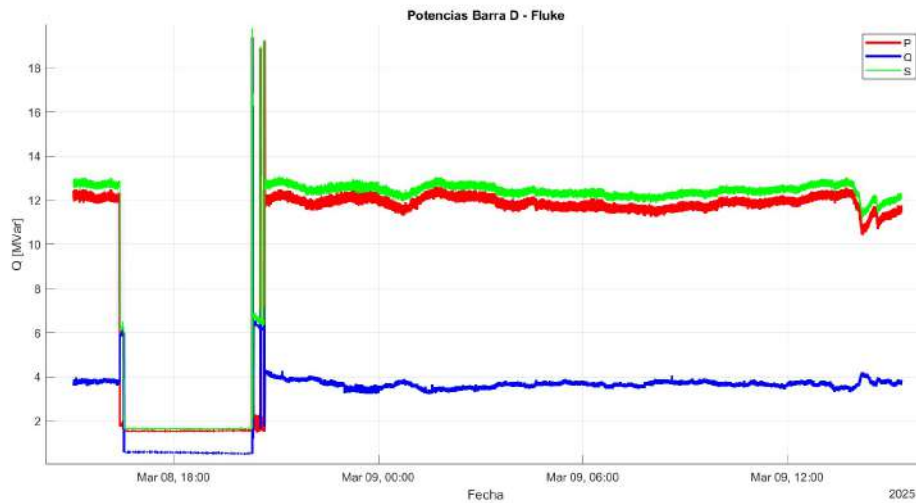


Figura 4.14: Comportamiento de las potencias en la barra D.

4.2.3.b. Factor de potencia

La figura 4.15 muestra el comportamiento del factor de potencia posterior a la mantención del molino SAG. Se observa que tiene valores negativos, con un promedio de 0,9557. El signo del factor de potencia indica que las cargas que se encuentran en esta barra, están entregando potencia reactiva inductiva a la red, la cual tiende a compensar la diferencia de potencia reactiva inductiva que consumen los motores de inducción. Con esta compensación, el factor de potencia se mejora considerablemente, tal como se mostró en la figura 4.4.

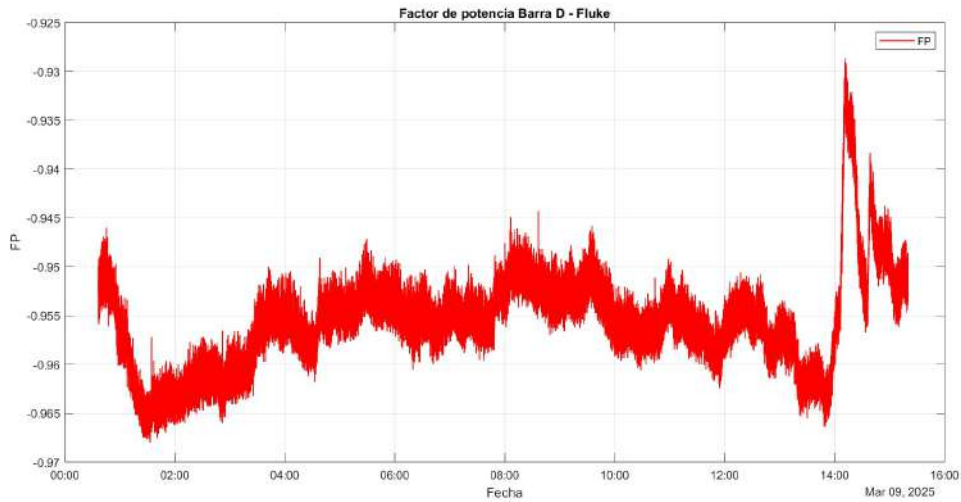


Figura 4.15: Factor de potencia barra D

Se registró un valor mínimo de 0,9287 tal como se detalla en la tabla 4.6.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	-0,9287	-0,9557	-0,968

Tabla 4.6: Factor de potencia Barra D.

4.2.3.c. Distorsión armónica de tensión y corriente

En este caso, la distorsión armónica total de corriente en la barra D se mueve entre valores de 0,71 % y 1,25 % tal como se muestra en la figura 4.16.

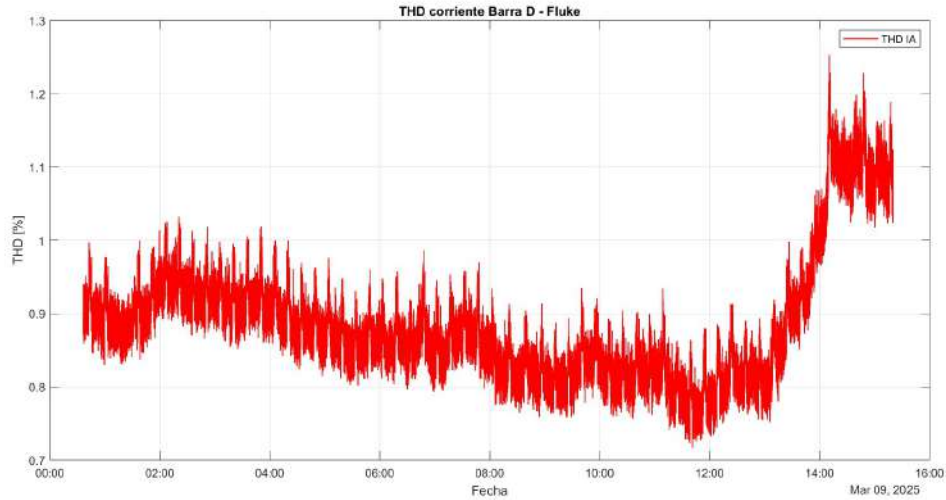


Figura 4.16: Distorsión armónica de corriente barra D

Finalmente, la distorsión armónica total de tensión se presenta en la figura 4.17 donde se observa que en promedio el valor del THD es 0,71 % que se registra en la tabla 4.7.

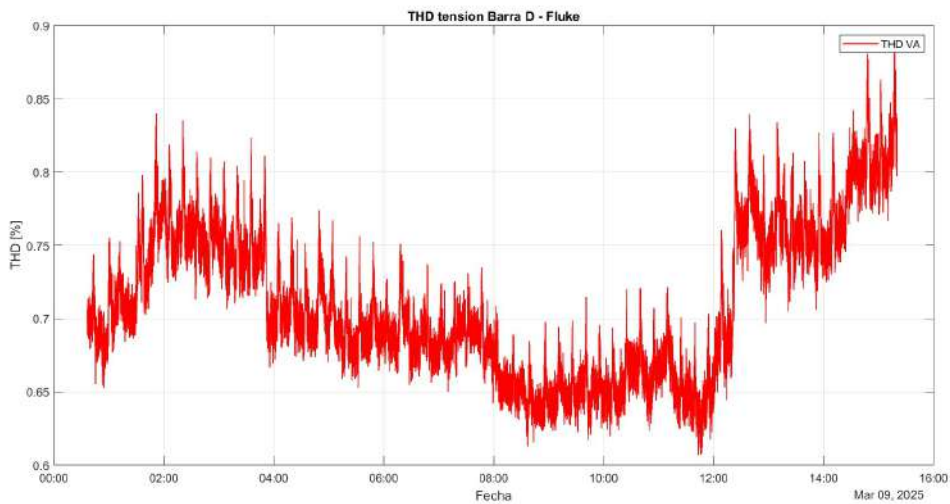


Figura 4.17: Distorsión armónica de tensión barra D

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	0,72	0,88	1,25
THD tensión [%]	0,61	0,71	0,89

Tabla 4.7: Distorsión armónica tensión Barra D.

4.2.4. Barra G

Esta barra tiene un nivel de tensión de 12,5 [kV] y alimenta los centros de distribución (CD 300, 301, 302 y 303) mediante 4 transformadores de 2000 [kVA] : T300, T301, T302 Y T303. La distribución de la alimentación de estos equipos se observa en la figura 4.18.

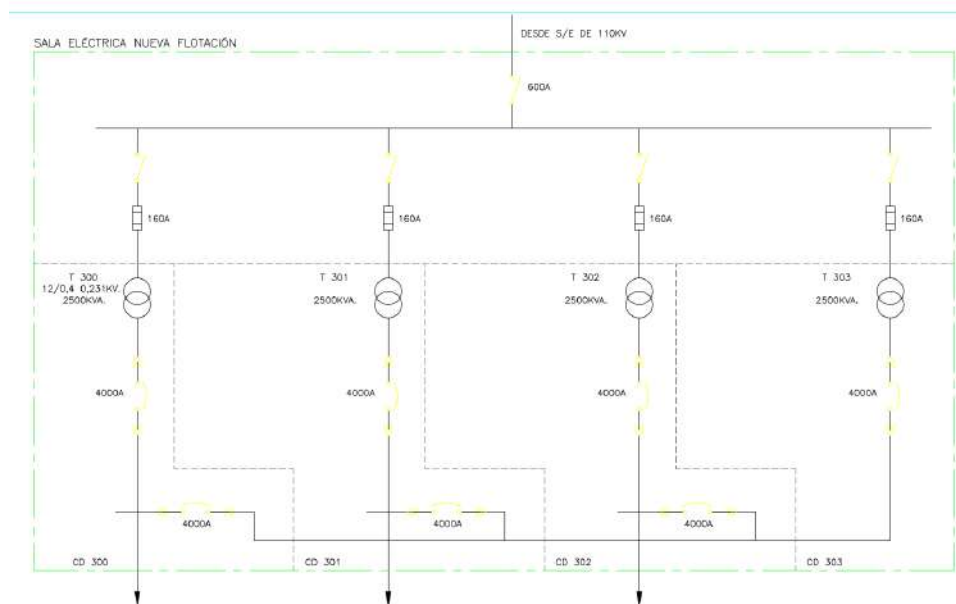


Figura 4.18: Distribución barra G.

Los equipos de interés en este análisis corresponden a las celdas WENCO 1500 y 3000, dado que los medidores en línea se ubican en los CCM que alimentan estas celdas. En el caso de la celda WENCO 3000 cuenta con 2 motores de 200 [HP] cada una, mientras que la celda WENCO 1500 son 3 filas (A, B y C), donde las filas A y B, cada una, tiene 9 motores de 100 [HP]. Por su parte, la fila C cuenta con 12 motores, donde 10 de ellos tienen una potencia de 75 [HP] y 2 de 100 [HP]. En otras secciones se realizará el análisis para cada uno de estos centros de distribución.

4.2.4.a. Potencias y factor de potencia

En esta barra se tiene una potencia promedio de 3,3 [MVA] con un comportamiento estable seegún la figura 4.39, lo que hace que sea un proceso considerable para el estudio de calidad de energía. Las cargas que se alimentan son en su mayoría motores asincrónicos con equipos de partida que funcionan con electrónica de potencia. Esto introduce a la red armónicos que perjudican la calidad de energía del sistema.

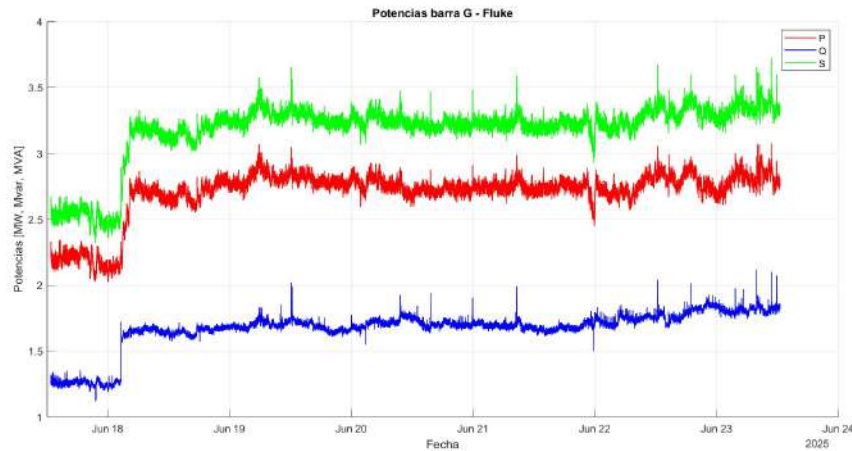


Figura 4.19: Comportamiento potencias barra G.

La figura 4.20 muestra el comportamiento del factor de potencia en la barra G, donde se alcanza un valor mínimo de 0,7963. En la tabla 4.8 se registran estos valores.

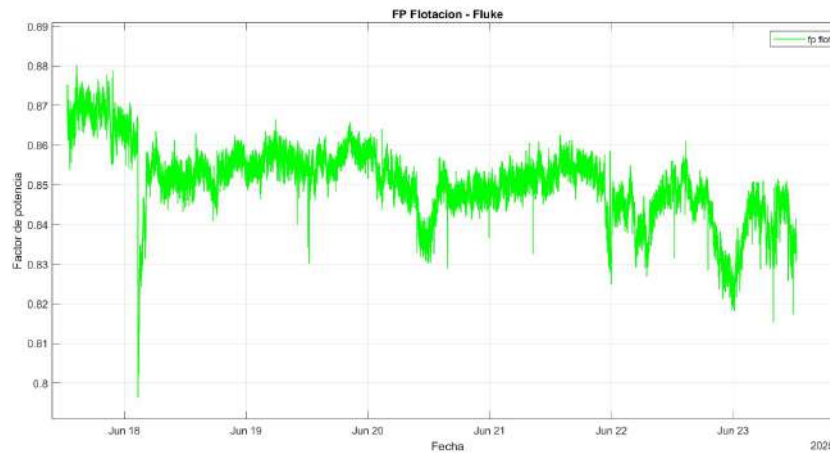


Figura 4.20: Factor de potencia barra G.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,7963	0,8505	0,8801

Tabla 4.8: Factor de potencia barra G.

4.2.4.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

En este punto de medición de la figura 4.21 la distorsión total armónica de corriente llega a valores de 9,97 %, con un promedio de 8,24 % lo cual ya comienza a ser considerable.

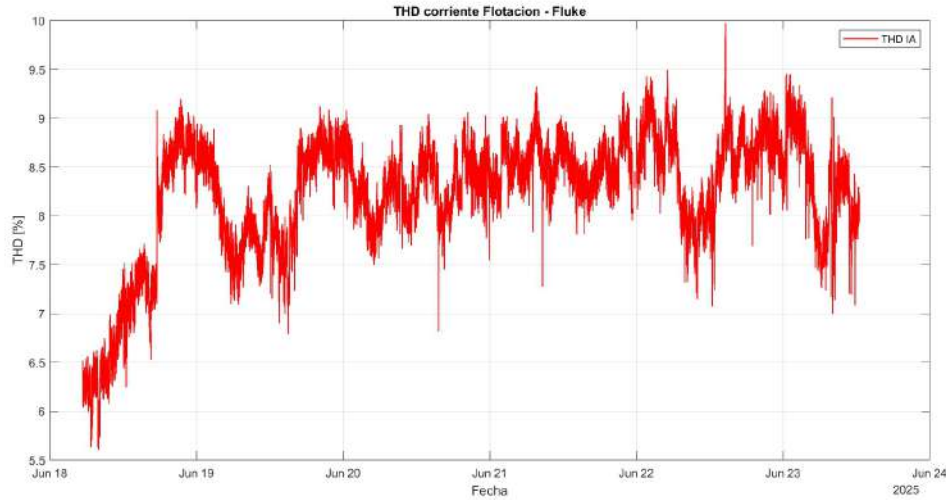


Figura 4.21: Distorsión armónica de corriente barra Flotación

En la figura 4.22 se observa el comportamiento del THD de la tensión en la barra G. Se alcanzan valores máximos de 1,01 %, esto se registra en la tabla 4.9.

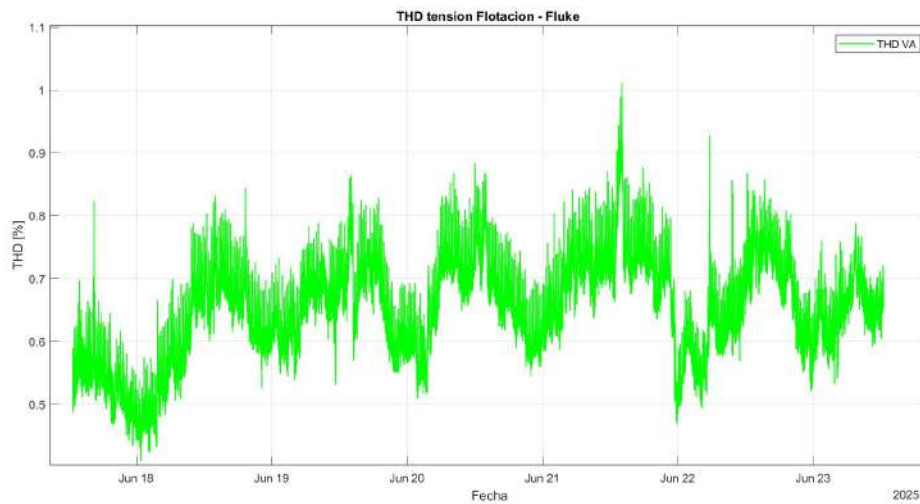


Figura 4.22: Distorsión armónica de tensión barra Flotación

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	5,61	8,24	9,97
THD tensión [%]	0,41	0,65	1,01

Tabla 4.9: Distorsión armónica de tensión barra G.

4.2.5. CD 300

El centro de distribución CD 300 se encuentra a un nivel de tensión de 400 [V]. Se alimentan equipos con un total de 1 [MVA] aproximadamente, entre los cuales se encuentran: las celdas WENCO 1500 Fila A, con un total de 9 motores de 100 [HP], y las celdas 1,2,11,12 de la fila C con dos motores de 75 [HP] y dos de 100 [HP]. Todos estos motores tienen un arranque directo. Los equipos se distribuyen en distintos puntos de conexión, tal como se presenta en la figura 4.23.

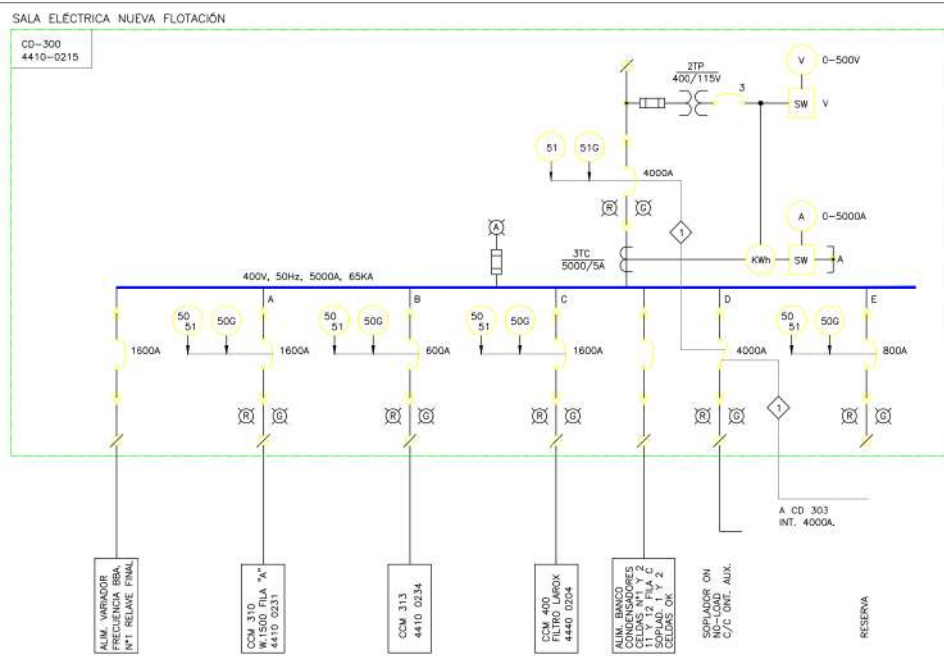


Figura 4.23: Equipos alimentados por los CD300.

En la tabla 4.10 se presenta el detalle de los equipos conectados en este centro de distribución, su conexión y respectiva potencia.

Equipo	Conexión	N°	Acc	P [HP]	P_{total} [HP]	P_{total} [kW]	
Wenco 1500 Fila A	CCM 310	9	Directa	100	900	671,4	
Wenco 1500 Fila C 1 y 2	CCM 410	2	Directa	75	150	111,9	
Wenco 1500 Fila C 11 y 12	CCM 410	2	Directa	100	200	149,2	
Bbas Rebose Espesadores	CCM 400	2	VDF	100	200	149,2	
Bbas M 2000 (1 stand by)	M. 2000	2	VDF	400	800	596,8	
Bba piso relave final	VDF	1	VDF	150	150	111,9	
Bba lubricacion mol 2000	CCM 313	Bajo consumo					

Tabla 4.10: Equipos alimentados por CD 300.

4.2.5.a. Potencias y factor de potencia

La figura 4.24 se observa que la potencia demandada por las cargas tiene un valor promedio de 800 [kW] y una potencia reactiva considerable de 600 [kVAr].

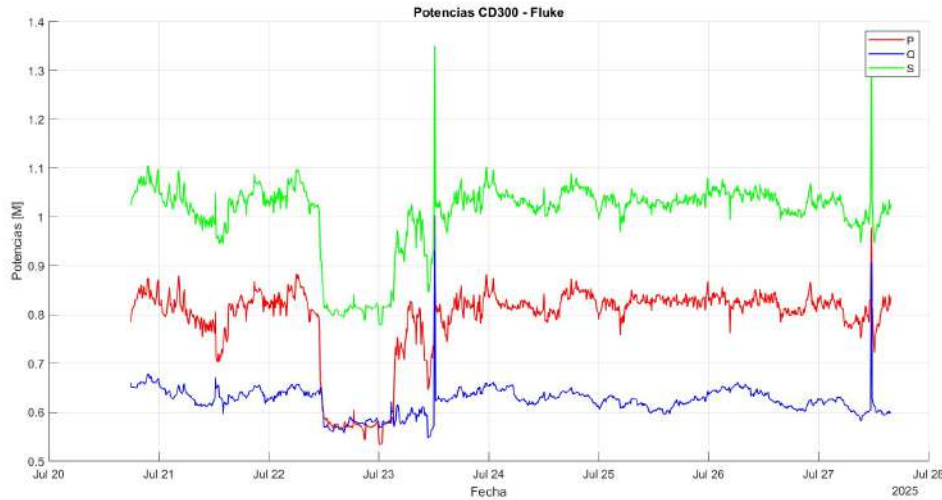


Figura 4.24: Comportamiento potencias CD 300.

Por su parte, del gráfico de la figura 4.25 se observa que el factor de potencia tiene un comportamiento alcanzando un máximo de 0,8154 y un mínimo de 0,6878. Ambos valores se registran en la tabla 4.11.

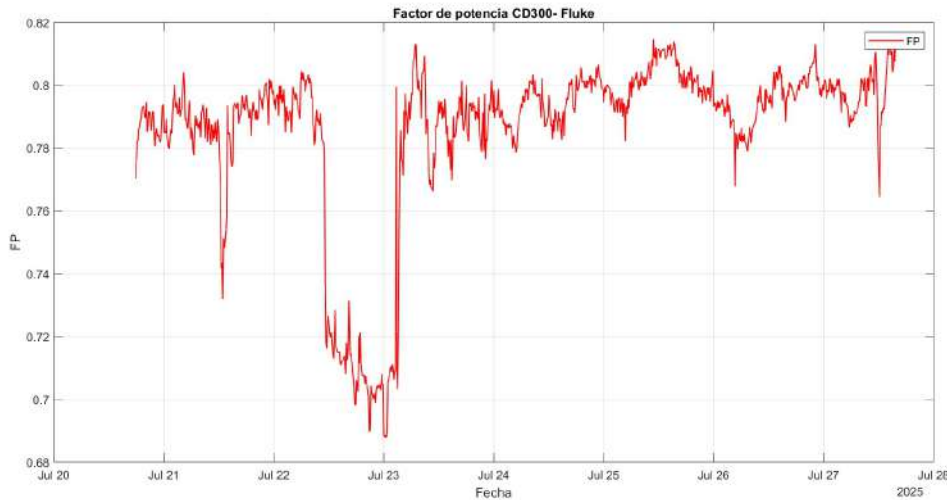


Figura 4.25: Factor de potencia CD 300

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,6878	0,7857	0,8154

Tabla 4.11: Factor de potencia CD 300.

4.2.5.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

La figura 4.26 muestra el comportamiento del THD de corriente en el CD 300, donde se alcanza un valor máximo de 12,53 %. Se observa que existe una distorsión armónica considerable en las cargas.

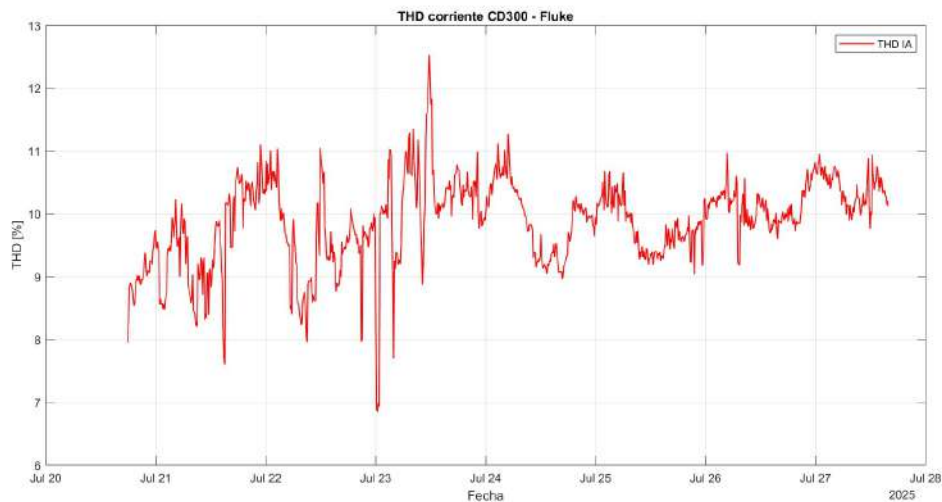


Figura 4.26: Distorsión armónica de corriente CD 300

En este caso, del gráfico de la figura 4.27 se alcanza un valor máximo de 3,02 % en el THD de tensión y se registra en la tabla 4.12.

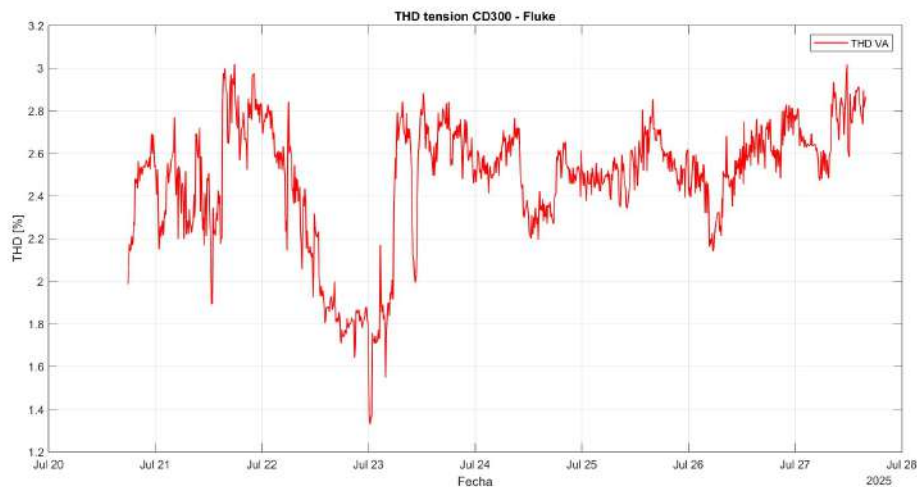


Figura 4.27: Distorsión armónica de tensión CD 300

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	6,85	9,87	12,53
THD tensión [%]	1,33	2,48	3,02

Tabla 4.12: Distorsión armónica de tensión CD 300.

4.2.6. CD 301

La figura 4.28 presenta el diagrama unilineal del centro de distribución CD 301 que se alimenta desde la barra G, a través del transformador T 301. Se tiene un nivel de tensión de 400 [V], para alimentar cargas tales como: Bombas filtro Larox (2 motores de 150 [HP]), Celdas 7-8-9-10 Wenco 1000 fila C (4 motores de 75 [HP]), Celdas Wenco 1500 fila B (9 motores de 100 [HP]). El detalle de estas cargas, sus conexiones y potencias se observan en la tabla 4.13.

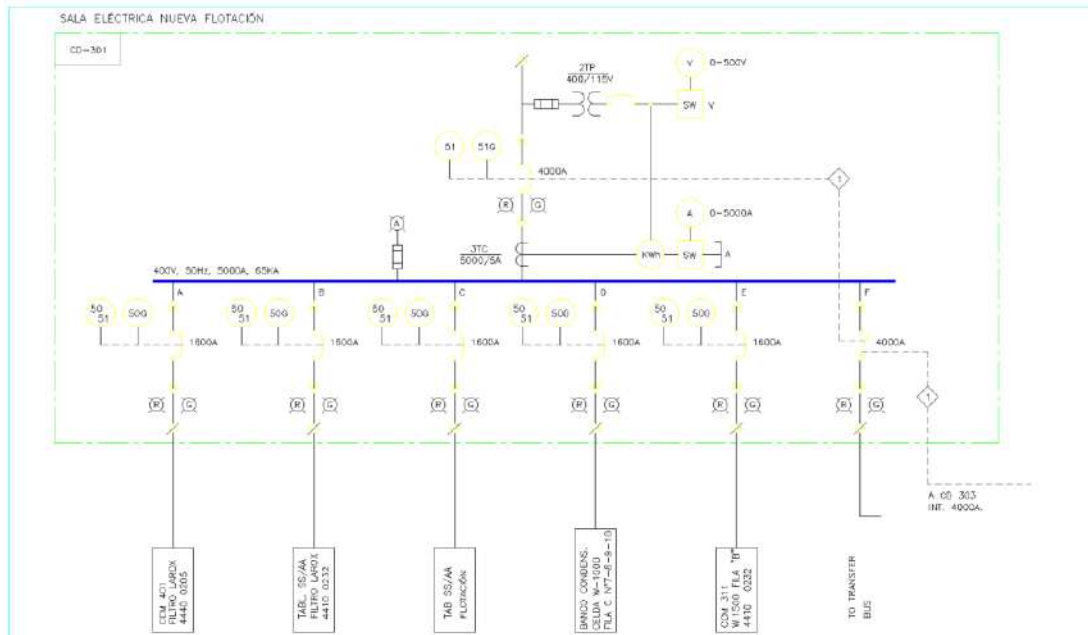


Figura 4.28: Equipos alimentados por los CD301.

Equipo	Conexión	Nº	Acc	P [HP]	P_{total} [HP]	P_{total} [kW]
Wenco 1500 Fila B	CCM 311	9	Directa	100	900	671,4
Wenco 1500 Fila C 7,8,9,10	CCM 410	4	Directa	100	400	298,4
Bbas Filtro LX	CCM 401			Bajo consumo		
SS.AA Filtro Larox	CCM 405			Bajo consumo		
SS.AA Flotacion				Bajo consumo		
Condesadores				Bajo consumo		

Tabla 4.13: Equipos alimentados por CD 301.

4.2.6.a. Potencias y factor de potencia

Se tiene una potencia activa promedio de 680 [kW] con un alto nivel de reactivos, en torno a 597 [kvar], tal como se observa en la figura 4.29.

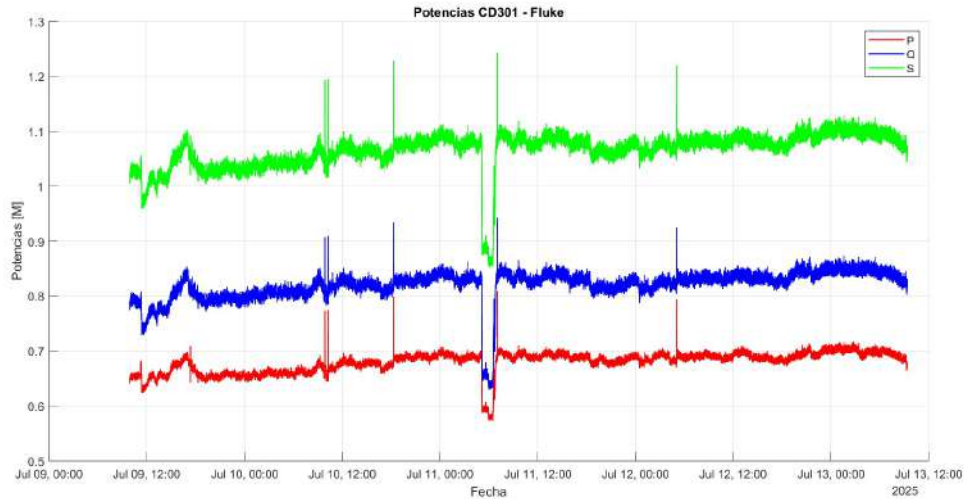


Figura 4.29: Comportamiento potencias CD 301.

El factor de potencia reflejado en la figura 4.30, tiene un valor mínimo de 0,6320 debido a las cargas inductivas y a los armónicos presentes en la red. Estos valores se registran en la tabla 4.14.

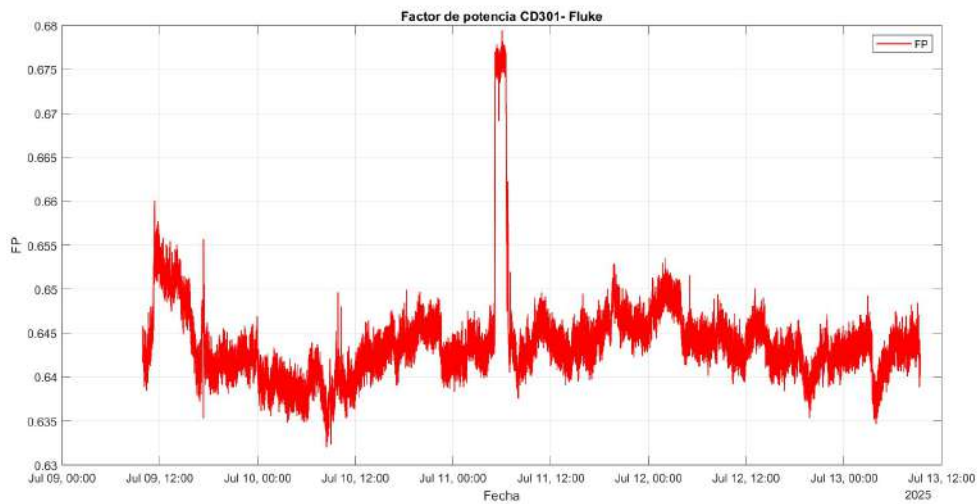


Figura 4.30: Factor de potencia CD 301

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,6320	0,6439	0,6794

Tabla 4.14: Factor de potencia CD 301.

4.2.6.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

Finalmente, la distorsión armónica de corriente en este CD se muestra en la figura 4.31 donde se alcanza un valor máximo de 5,6 % , y se tiene un promedio de 3,2 %.

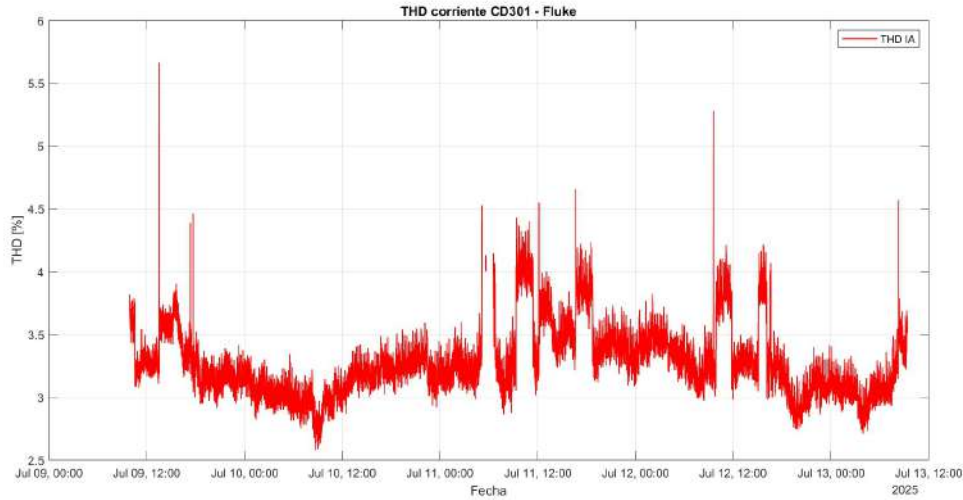


Figura 4.31: Distorsión armónica de corriente CD 301

El THD de tensión para el CD 301, se comporta entre valores en torno al 1% tal como se presenta en la figura 4.32 y sus valores se registran en la tabla 4.15.

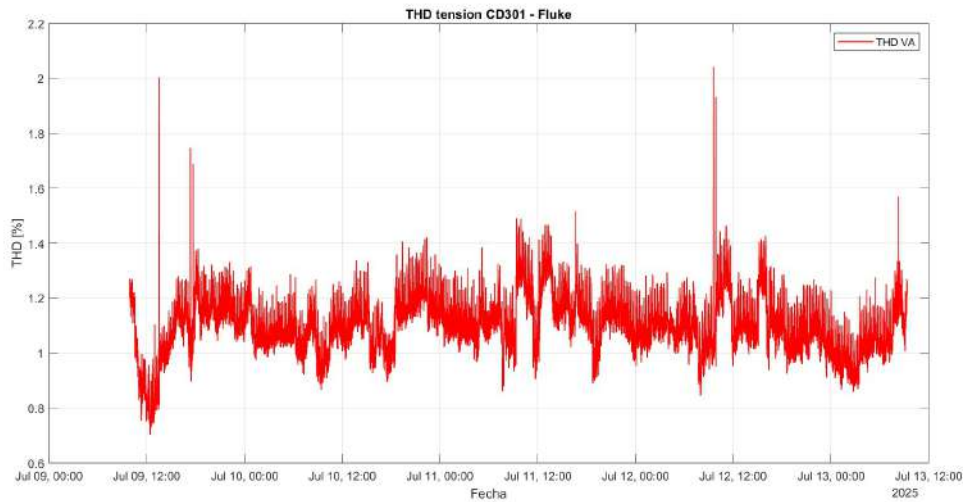


Figura 4.32: Distorsión armónica de tensión CD 301

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	2,58	3,28	5,66
THD tensión [%]	0,70	1,11	2,04

Tabla 4.15: Distorsión armónica de tensión CD 301.

4.2.7. CD 302

De la figura 4.33 se observa que este centro de distribución se alimenta desde la barra G, a través del transformador T 302. Se tiene un nivel de tensión de 400 [V], para alimentar cargas tales como: celdas Wenco 3000 de dos motores de 200 [HP], las celdas Wenco 1500 3,4,5,6 de la fila C con 75 [HP] cada una. Las celdas Wenco 3000 tienen partidores suaves, mientras que la Wenco 1500 fila C son con partida directa. El detalle de las cargas y sus potencias se presenta en la tabla 4.16.

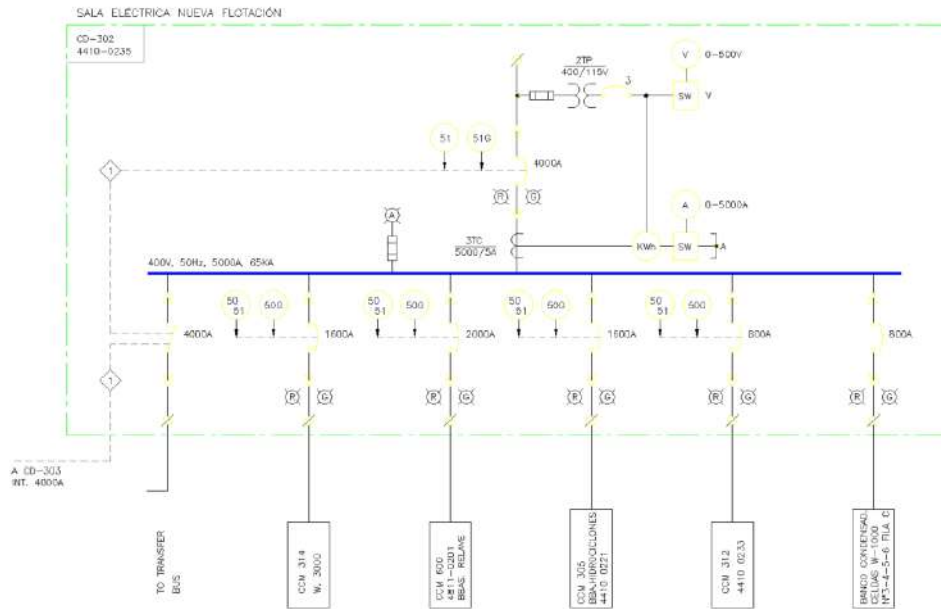


Figura 4.33: Equipos alimentados por los CD302.

Equipo	Conexión	N°	Acc	P [HP]	P_{total} [HP]	P_{total} [kW]	
W. 3000	CCM 314	2	P. suave	200	400	298,4	
W. 1500 Fila C 3,4,5,6	CCM 410	4	Directa	100	400	298,4	
Bbas relave antiguo	CCM 600	1	VDF	350	350	261,1	
Bbas 1 y 2 remolienda	CCM 600	2	VDF	350	700	522,2	
Celda 7 Fila B	CCM 312	1	Directa	100	100	74,6	
Bbas R. Columna	CCM 305	2	Directa	100	200	149,2	
Bbas Molino 2000	CCM 312	Bajo consumo					
Condesadores		Fuera de servicio					

Tabla 4.16: Equipos alimentados por CD 302.

4.2.7.a. Potencias y factor de potencia

Para este caso se tiene una potencia promedio de 750 [kW], muy similar al CD 300 y que tiene el comportamiento mostrado en la figura 4.34.

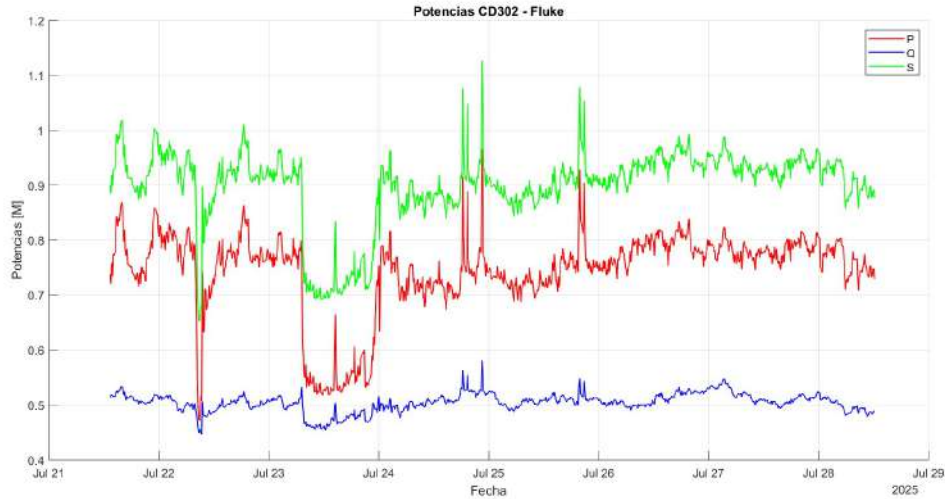


Figura 4.34: Comportamiento potencias CD 302.

El factor de potencia reflejado en la figura 4.35, llega a un mínimo de 0,7088 debido a las cargas inductivas y a los armónicos presentes en la red. Estos valores se registran en la tabla 4.17.

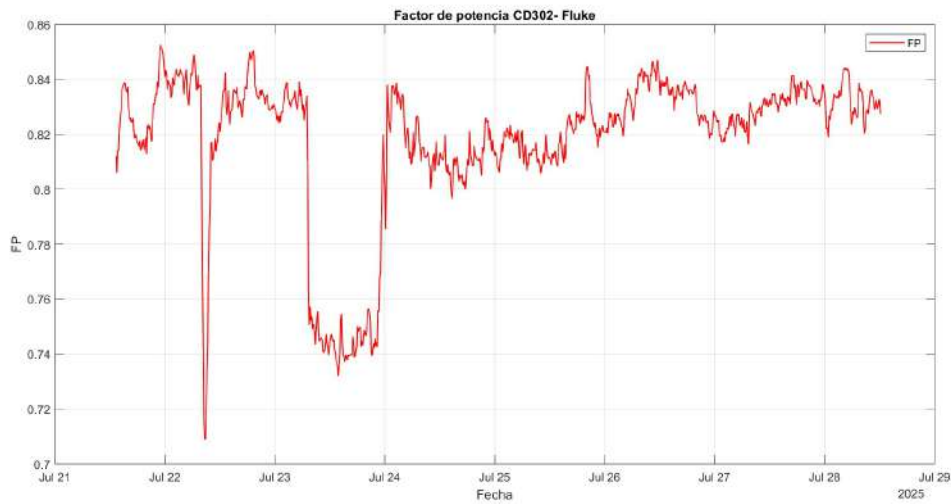


Figura 4.35: Factor de potencia CD 302

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,7088	0,818	0,8526

Tabla 4.17: Factor de potencia CD 302.

4.2.7.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

Finalmente, la distorsión armónica de corriente en este CD se muestra en la figura 4.36 donde se alcanza un valor máximo de 18,82 % , y se tiene un promedio de 13,91 %.

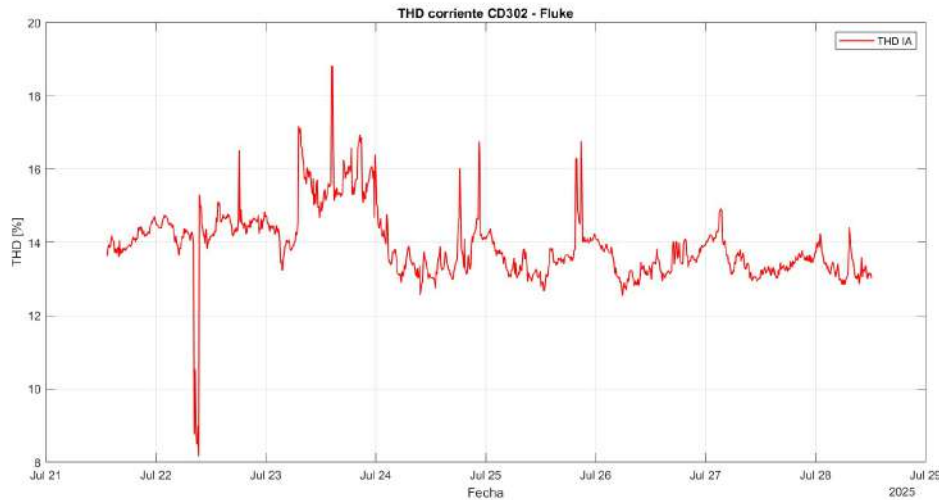


Figura 4.36: Distorsión armónica de corriente CD 302

El THD de tensión para el CD 302, se comporta entre valores en torno al 2% tal como se presenta en la figura 4.37. Este valor se registra en la tabla 4.18.

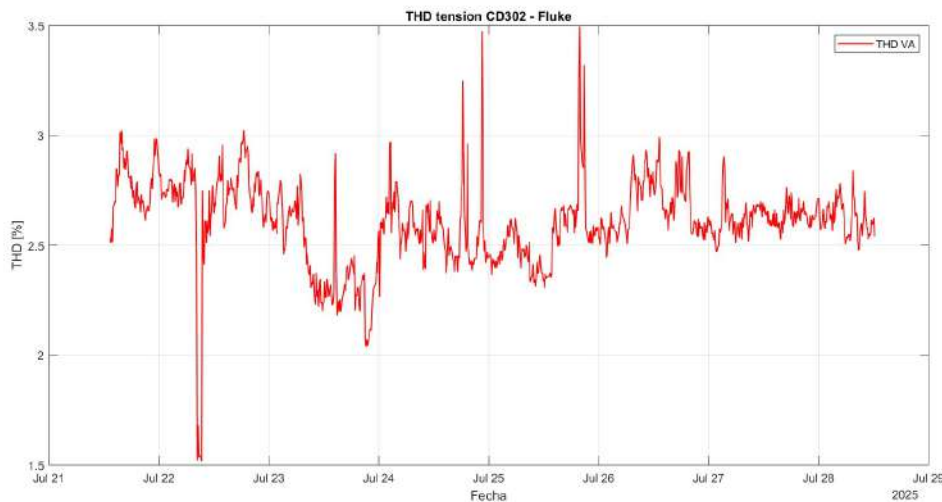


Figura 4.37: Distorsión armónica de tensión CD 302

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	8,17	13,91	18,82
THD tensión [%]	1,52	2,60	3,49

Tabla 4.18: Distorsión armónica de tensión CD 302.

4.2.8. Barra J

Esta barra tiene un nivel de tensión de 12,5 [kV] y alimenta los centros de distribución (CD 3,2,7 Y 8) en 400 [v] mediante cuatro transformadores de 1250 [kVA] : T3, T2, T7 y T8. La distribución de la alimentación de estos equipos se observa en la figura 4.38. Entre los equipos principales que se alimentan desde esta barra se encuentran: Molino 1 de 737 [HP], Molino 2 de 500 [HP], Molino 7 de 737 [HP], Molino 8 de 737 [HP] y Molino 9 de 476 [HP].

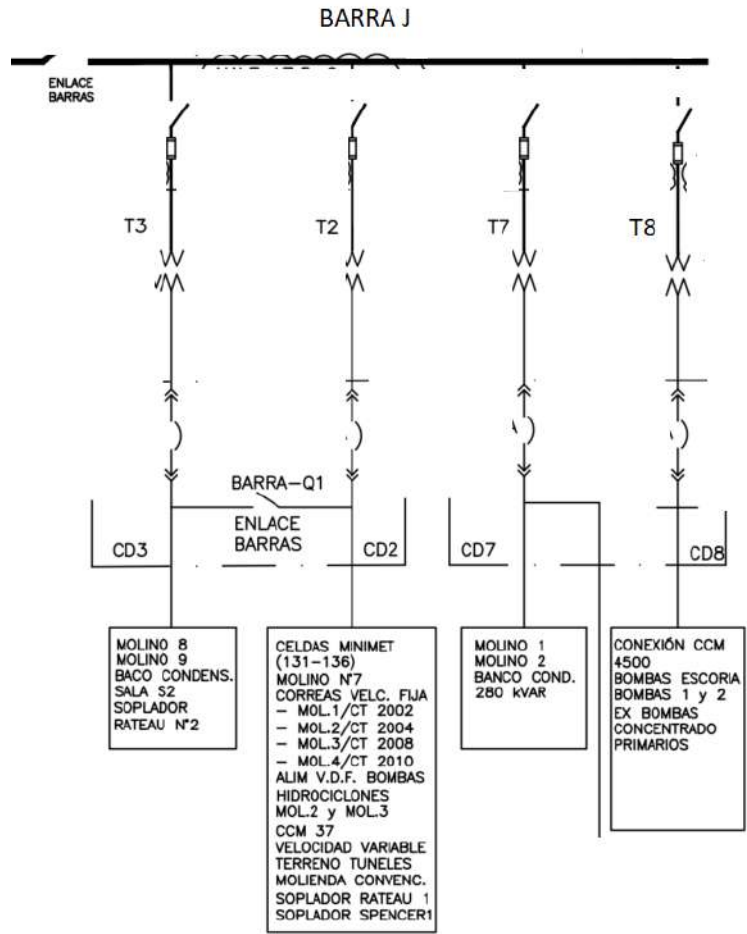


Figura 4.38: Distribución barra J [5].

4.2.8.a. Potencias y factor de potencia

Esta barra tiene una potencia activa promedio de 2,7 [MW], que varía según los equipos que se encuentren operando tal como se muestra en la figura 4.39. Además, se observa que la potencia reactiva llega a 2,15 [MVar] en promedio.

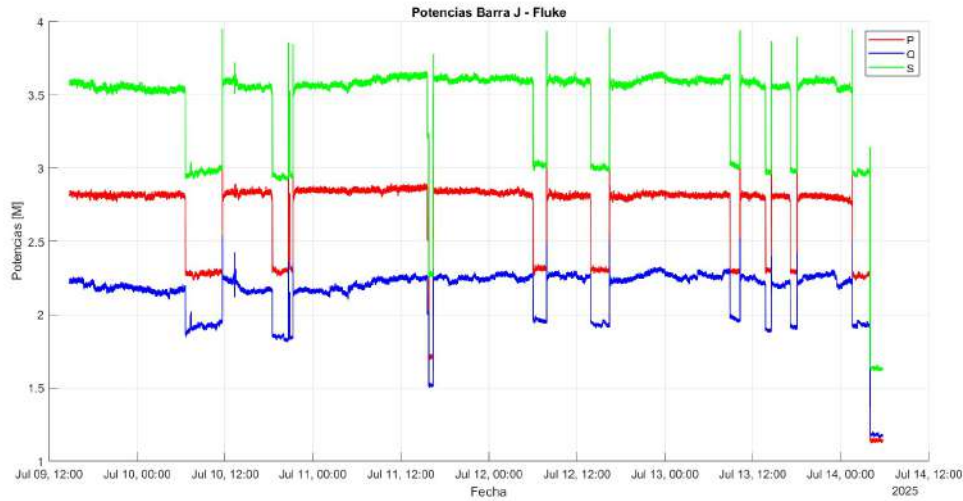


Figura 4.39: Comportamiento potencias barra J.

El factor de potencia medido en la barra J se observa en la figura 4.40, donde se tiene un valor promedio de 0,7842. Este valor se registra en la tabla 4.19.

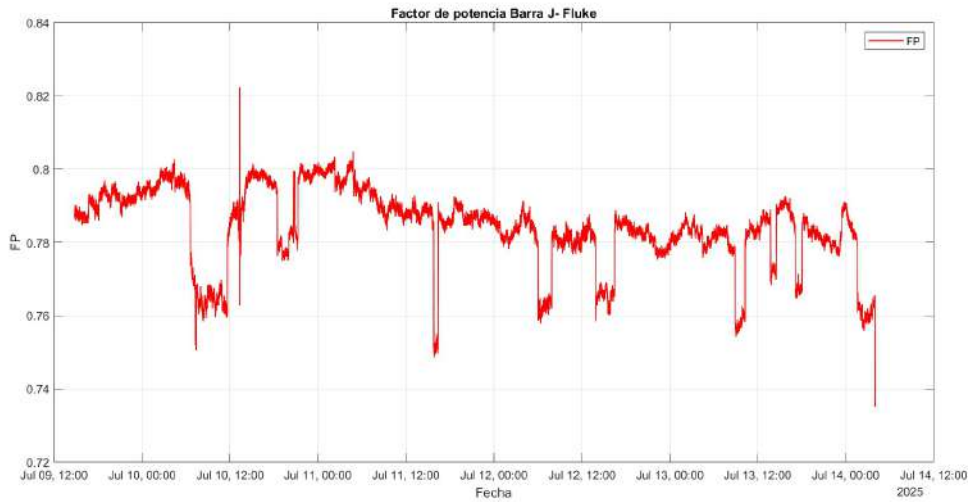


Figura 4.40: Factor de potencia barra J.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,7291	0,7842	0,8224

Tabla 4.19: Factor de potencia barra J.

4.2.8.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

El nivel de armónicos en la corriente se observa en la figura 4.41, donde se alcanza un máximo de 3,52 %.

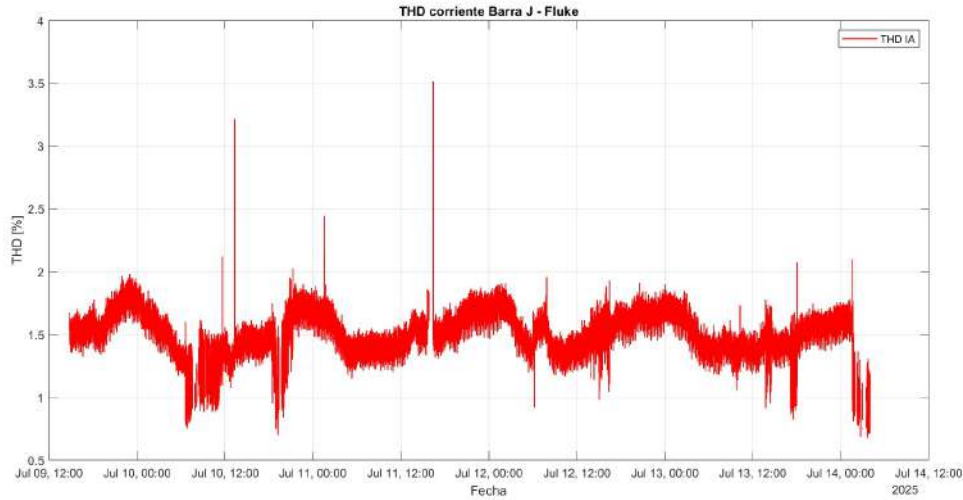


Figura 4.41: Distorsión armónica de corriente barra J.

En el caso de la distorsión armónica de tensión, se obtiene un valor máximo de 1,24 % tal como se muestra en la figura 4.42. Estos valores se detallan en la tabla 4.20.

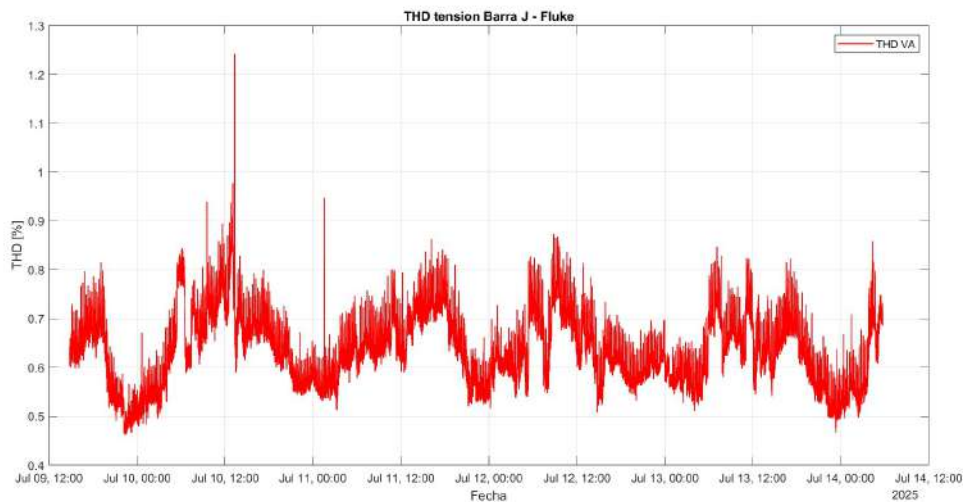


Figura 4.42: Distorsión armónica de tensión barra J.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	0,67	1,49	3,52
THD tensión [%]	0,46	0,64	1,24

Tabla 4.20: Distorsión armónica de tensión barra J.

4.2.9.a. Potencias y factor de potencia

Según la figura 4.44 en operación normal se tiene una demanda de 3 [MVA] lo que se distribuye en 2,5 [MW] y 1,7 [MVar] de potencia reactiva.

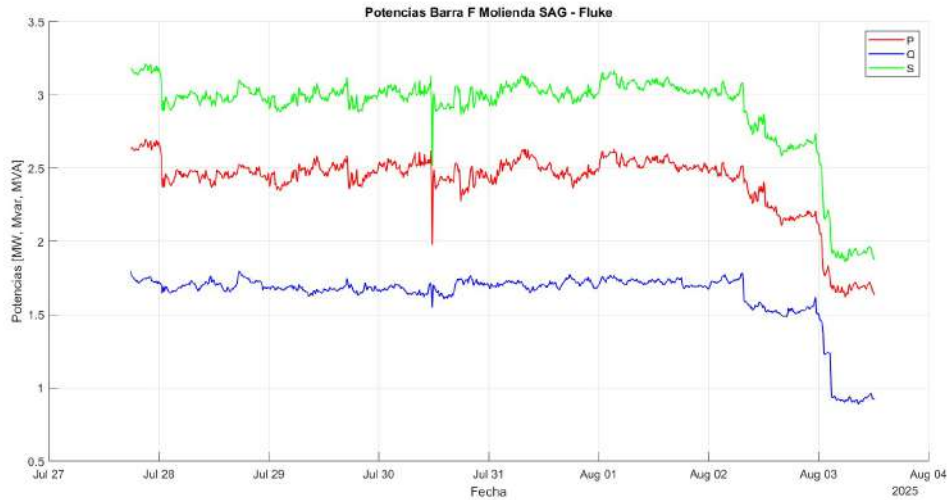


Figura 4.44: Comportamiento potencias barra F.

Tal como se mostró en la figura anterior existe una cantidad considerable de reactivos en esta barra. Esto se traduce en el factor de potencia de la figura 4.45, donde se alcanza un mínimo de 0,787 y un promedio de 0,8252. Ambos valores se registran en la tabla 4.21.

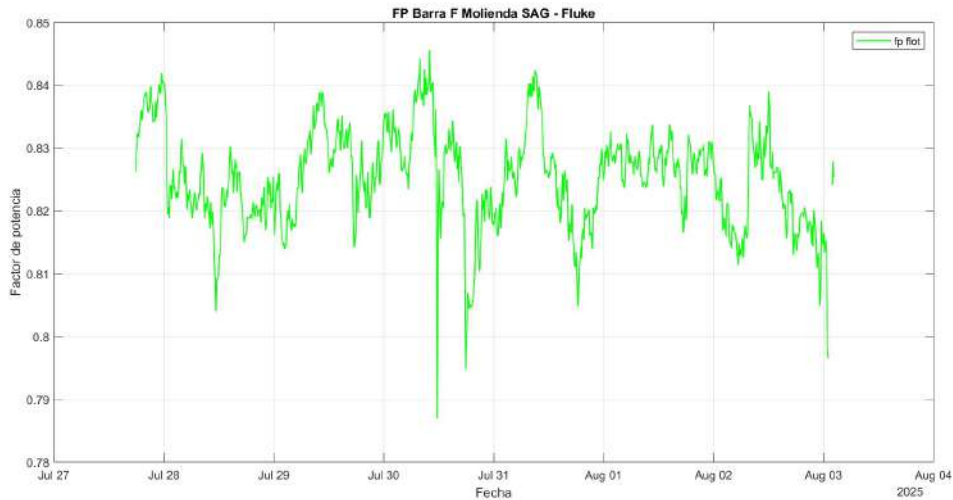


Figura 4.45: Factor de potencia barra F.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,787	0,8252	0,8456

Tabla 4.21: Factor de potencia Barra F.

4.2.9.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

Se realizó una medición de una semana para cumplir con la normativa y se obtuvieron los resultados de la figura 4.46. Se alcanza un peak de 11,08 % y un promedio de 8,42 %.

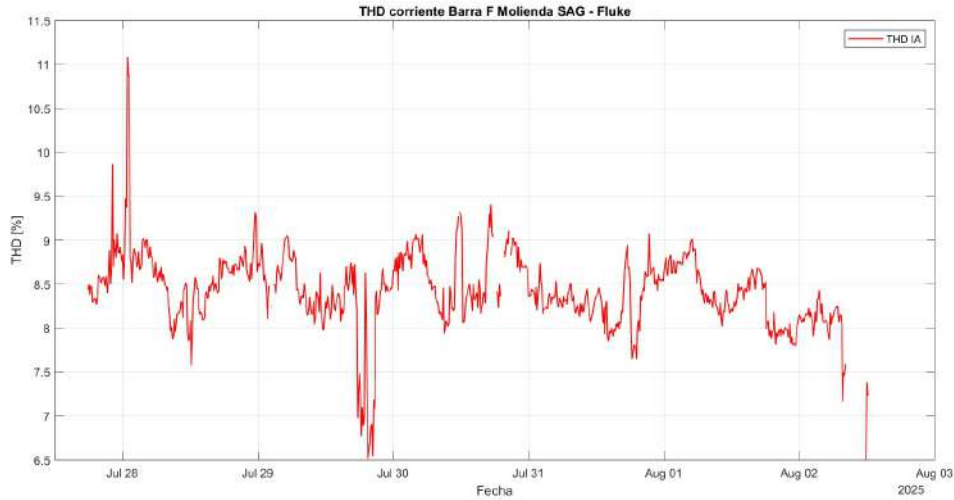


Figura 4.46: Distorsión armónica de corriente barra F.

En este caso se tiene el comportamiento de la figura 4.47 y se obtuvo un máximo de 0,94 % y un promedio de 0,69 %, ambos valores registrados en la tabla 4.22.

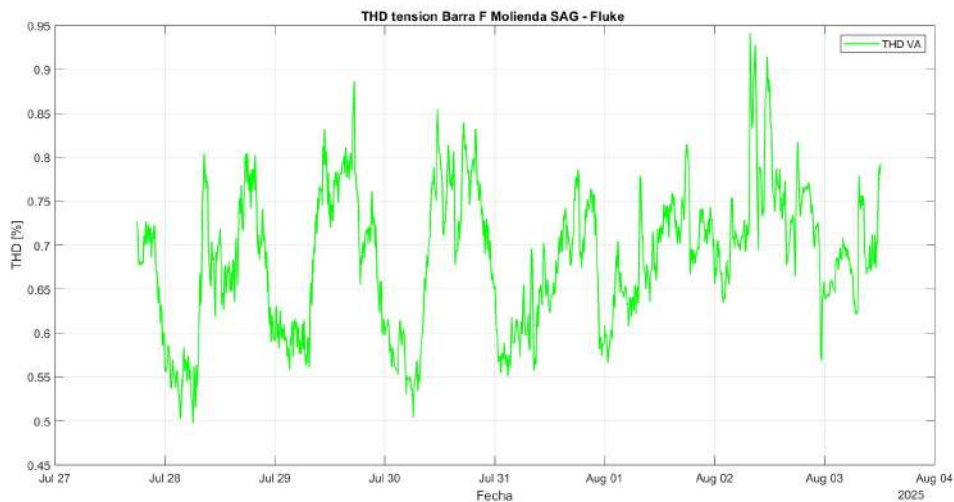


Figura 4.47: Distorsión armónica de tensión barra F.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	6,50	8,42	11,09
THD tensión [%]	0,49	0,69	0,94

Tabla 4.22: Distorsión armónica de corriente Barra F.

4.2.10. Flotación arenas

Esta barra alimenta los equipos de la flotación arenas, la cual representa el 26% del consumo eléctrico de flotación. Más adelante se profundizará más acerca de los equipos que se encuentran operando dentro de esta sección, pero dentro de ellos están: celdas de flotación, molino de remolienda arenas, bombas de los trenes de relave. Estos últimos cuentan con tres trenes distribuidos con dos bombas cada uno - una con variador de frecuencia y otra con partida directa. La figura 4.48 muestra la disposición eléctrica obtenida desde el diagrama unilineal, donde se observa que hay una operación en paralelo de transformadores de 1250 [kVA] para alimentar los CD-01 y CD-02.

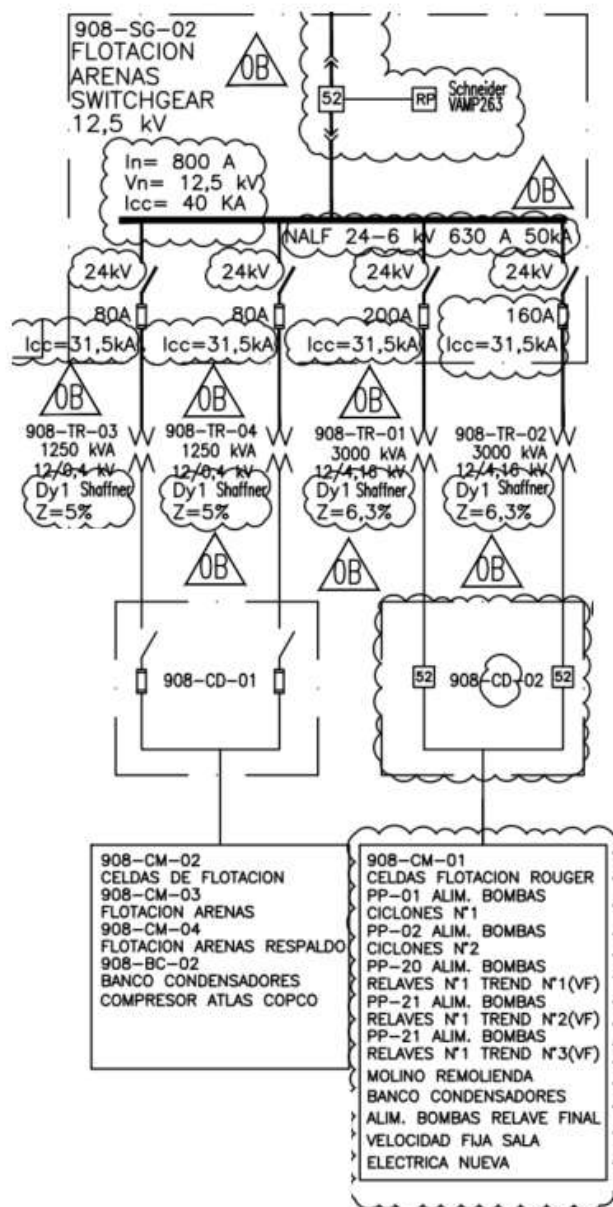


Figura 4.48: Diagrama conexión de la Flotación Arenas [5].

4.2.10.a. Potencias y factor de potencia

En esta sección de flotación se tiene un consumo de alrededor de los 2,5 [MW], con un factor de potencia promedio de 0,9334. En la figura 4.49 se observa que durante los primeros dos días se tenía una menor demanda del rango de 1 [MVA] y luego se estabiliza.

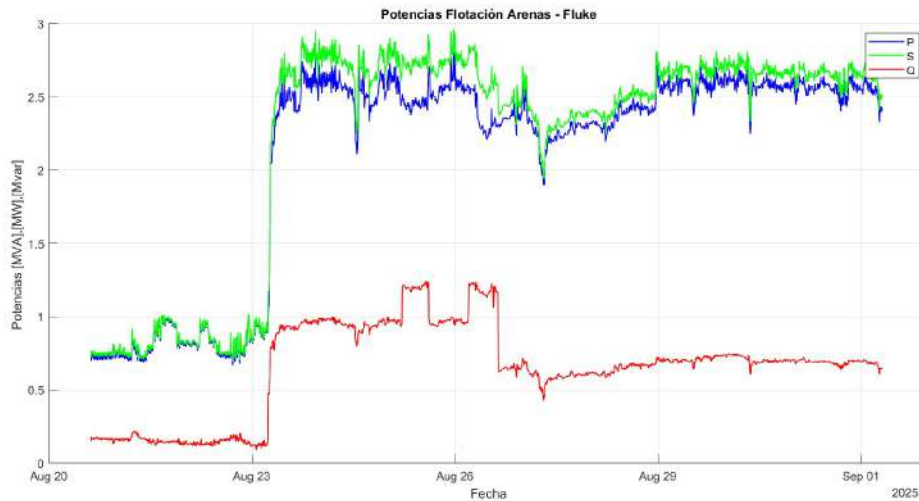


Figura 4.49: Comportamiento potencias Flotación arenas.

La figura 4.50 muestra el comportamiento del factor de potencia, se observa que llega a un mínimo de 0,3818 al aumentar la demanda. Estos valores se registran en la tabla 4.23.

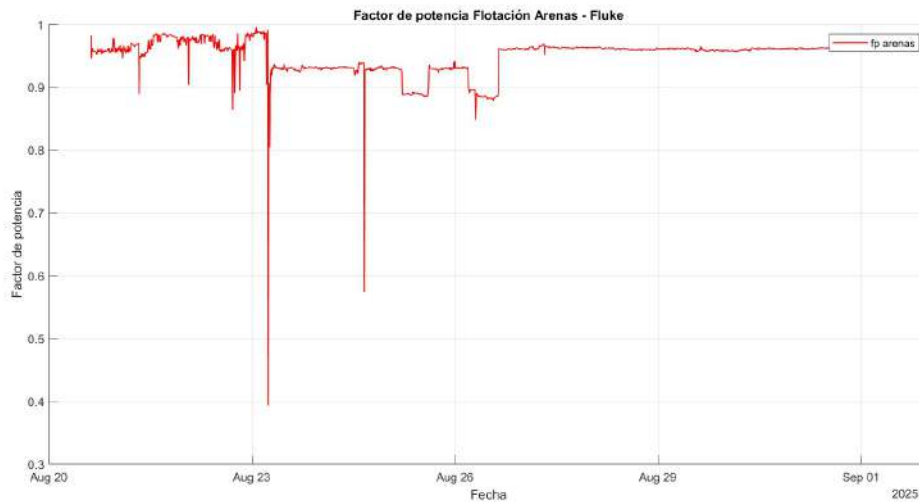


Figura 4.50: Factor de potencia Flotación arenas.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de potencia	0,3818	0,9334	0,9726

Tabla 4.23: Factor de potencia Flotación arenas.

4.2.10.b. Distorsión armónica de tensión y corriente

El nivel de armónicos de corriente en la flotación arenas se presenta en la figura 4.51, donde se alcanza un peak de 38,89% y un promedio de 3,69%.

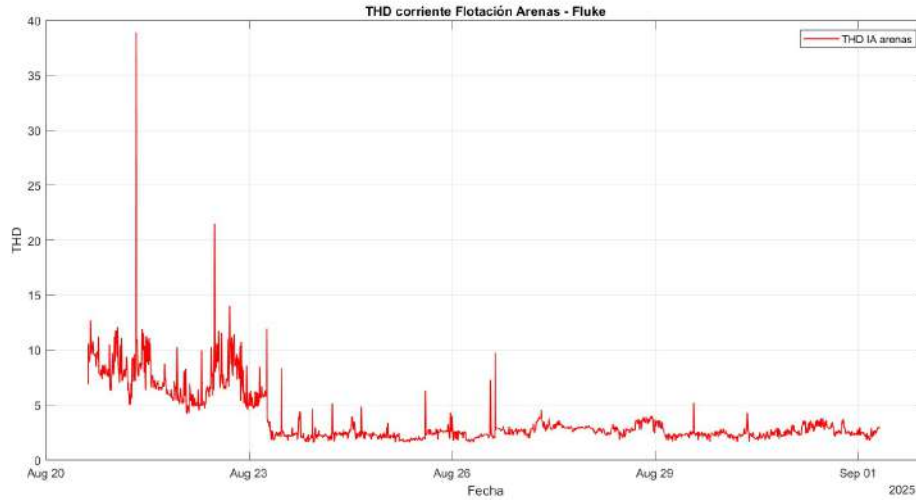


Figura 4.51: Distorsión armónica de corriente Flotación arenas.

En el caso de los armónicos de tensión en esta barra se observa en la figura 4.52 que en promedio se tiene un valor de 0,79%. Estos valores se registran en la tabla 4.24.

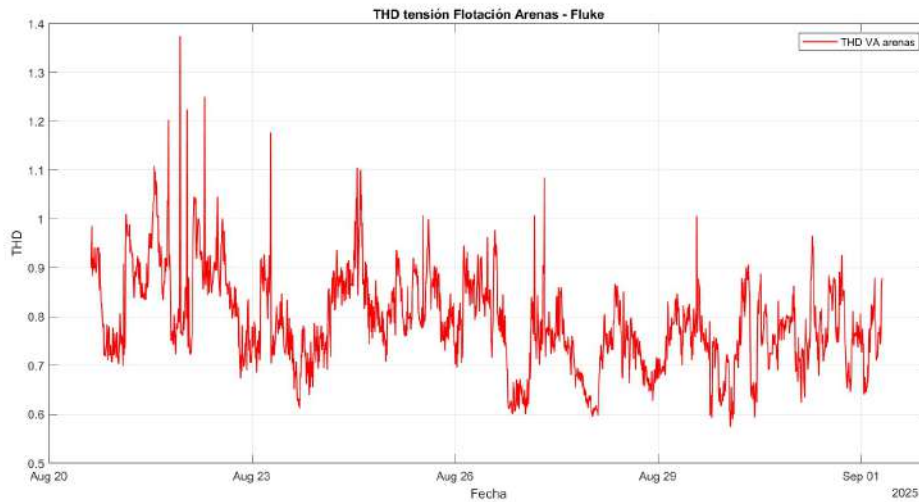


Figura 4.52: Distorsión armónica de tensión Flotación arenas.

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
THD corriente [%]	1,59	3,69	38,89
THD tensión [%]	0,57	0,79	1,37

Tabla 4.24: Distorsión armónica de corriente Flotación arenas.

4.3. Resultados

A continuación se presenta un resumen de los datos obtenidos en las mediciones. La tabla 4.25 muestra la distorsión armónica de corriente para todos los puntos de medición realizados. Se observa que en los casos de CD 300 y CD 302, el valor del THD supera a lo establecido por la norma. En el caso de la barra B, se observa que al operar sin el molino SAG los niveles de distorsión armónica superan al 6 % máximo establecido por la norma.

Medición	V_{LL} [kV]	I_{sc} [kA]	I_L [A]	I_{sc}/I_L	THD_{Norma}	THD_{Prom}	THD_{Max}
Barra B	110	10	166,7	60,0	6 %	1,96 %	8,39 %
Barra C	12,5	40	1074	37,2	8 %	3,4 %	5,16 %
Barra D	4,16	40	3025	13,2	5 %	0,88 %	1,25 %
Barra F	12,5	31,5	171,8	183,4	15 %	8,42 %	11,08 %
Barra G	12,5	31,5	175	180,0	15 %	8,24 %	9,97 %
Barra J	12,5	31,5	196	160,7	15 %	1,49 %	3,52 %
Arenas	12,5	40	299,7	133,5	15 %	3,7 %	38,9 %
CD 300	0,4	65	2134	30,5	8 %	9,87 %	12,53 %
CD 301	0,4	65	1326	49	8 %	3,28 %	5,66 %
CD 302	0,4	65	1702,4	38,2	8 %	13,91 %	18,82 %

Tabla 4.25: Resultados distorsión armónica de corriente.

En cambio, la tabla 4.26 presenta los valores de la distorsión armónica de tensión en los mismos puntos, donde se observa que en ningún caso se supera lo permitido por la normativa.

Medición	V_{LL} [kV]	THD_{Norma} [%]	THD_{Prom} [%]	THD_{Max} [%]
Barra B	110	2,5	0,75	1,12
Barra C	12,5	5	0,79	1,18
Barra D	4,16	5	0,71	0,89
Barra F	12,5	5	0,68	0,94
Barra G	12,5	5	0,65	1,01
Barra J	12,5	5	0,64	1,24
Arenas	12,5	5	0,78	1,37
CD 300	0,4	8	2,48	3,02
CD 301	0,4	8	1,11	2,04
CD 302	0,4	8	2,6	3,49

Tabla 4.26: Resultados distorsión armónica de tensión.

La Tabla 4.27 muestra los valores mínimos y promedios de factor de potencia medidos en distintos puntos del sistema eléctrico de la planta El Soldado, comparados con los límites establecidos por la normativa chilena para Clientes Libres según el nivel de tensión.

Medición	V_{LL} [kV]	FP_{norma}	FP_{minimo}	$FP_{promedio}$
Barra B	110	0,98	0,8744	0,965
Barra C	12,5	0,93	0,753	0,8625
Barra D	4,16	0,96	0,9287	0,9557
Barra F	12,5	0,93	0,787	0,8252
Barra G	12,5	0,93	0,7963	0,8505
Barra J	12,5	0,93	0,7291	0,7842
Arenas	12,5	0,93	0,3818	0,9334
CD 300	0,4	0,93	0,6878	0,7857
CD 301	0,4	0,93	0,6320	0,6439
CD 302	0,4	0,93	0,7088	0,818

Tabla 4.27: Resultados factor de potencia.

A partir de los datos se concluye que en la planta El Soldado se evidenció incumplimientos relevantes en el factor de potencia en distintos niveles de tensión. La barra B de 110 [kV] mostró un valor mínimo de 0,8744 y un promedio de 0,965, ambos por debajo del 0,98 exigido, lo que la convierte en un punto crítico especialmente en condiciones sin el molino SAG. En media tensión, las barras C, J y G (12,5 [kV]) presentaron promedios de 0,8625, 0,7842 y 0,8505, todos inferiores al mínimo de 0,93, mientras que la barra D (4,16 [kV]) registró un mínimo de 0,9287 y un promedio de 0,9557, incumpliendo marginalmente la norma. En baja tensión, los centros de distribución CD 300, CD 301 y CD 302 mostraron factores de potencia promedio de 0,7857, 0,6439 y 0,818, respectivamente, que, aunque no son fiscalizables, afectan aguas arriba y reflejan la necesidad de corrección.

Respecto a la distorsión armónica, los valores de tensión (THDv) se mantuvieron dentro de los límites de la norma IEEE 519-2022 [7], pero se detectaron problemas en la distorsión de corriente (THDi), especialmente en la barra B (8,39 % frente a un límite de 6 %) y en los centros de distribución CD 300 y CD 302, con máximos de 12,53 % y 18,82 % respectivamente, superando ampliamente el límite de 8 %. Estos resultados muestran que los mayores problemas de calidad de energía se concentran en baja tensión, asociados a cargas no lineales como motores con variadores de frecuencia. Se recomienda implementar filtros de armónicos y monitoreo continuo con medidores clase A, además de estrategias de compensación activa y control dinámico del factor de potencia para mejorar simultáneamente el FP y la calidad de energía.

Capítulo 5

Análisis de desempeño energético en las secciones de Molienda Convencional

En este capítulo se analizará el desempeño energético de las secciones de molienda convencional. La idea es generar una línea de base energética para cada una de las secciones conforme a la Norma ISO 50001:2018 [1]. Con esta línea base se busca tener un periodo de operación normal que sea de referencia para el análisis de años posteriores. Se construirá un modelo matemático que relacione variables relevantes del proceso con el consumo eléctrico, y así calcular los indicadores de desempeño energético (IDE) para realizar una comparación entre el consumo real y el consumo del modelo.

Además, se incluirán los datos obtenidos de los medidores en línea de cada molino de bolas para analizar sus estados de operación durante el mes de julio de 2025.

5.1. Sistema de estudio

El alcance de este capítulo son las cuatro secciones de Molienda Convencional. La sección 1 es alimentada por la correa 2002 que llega directamente al molino 1 y luego se van traspasando hacia los otros molinos. La sección 2 es alimentada por la correa 2004, que introduce material al molino 4 y va circulando por los molinos 5 y 6. La sección 3 se alimenta a través de la correa 2008, que se conecta al molino 9 y luego pasa al molino 8. Finalmente está la sección 4, que tiene al molino 10 y 11, siendo éste último alimentado por la correa 2010. Estas secciones se sintetizan en el esquema de la figura 5.1 y representan el 62 % del consumo total del proceso de Molienda Convencional, donde el porcentaje restante se distribuye en un 28 % del Molino 2000 y un 10 % de otros consumos.

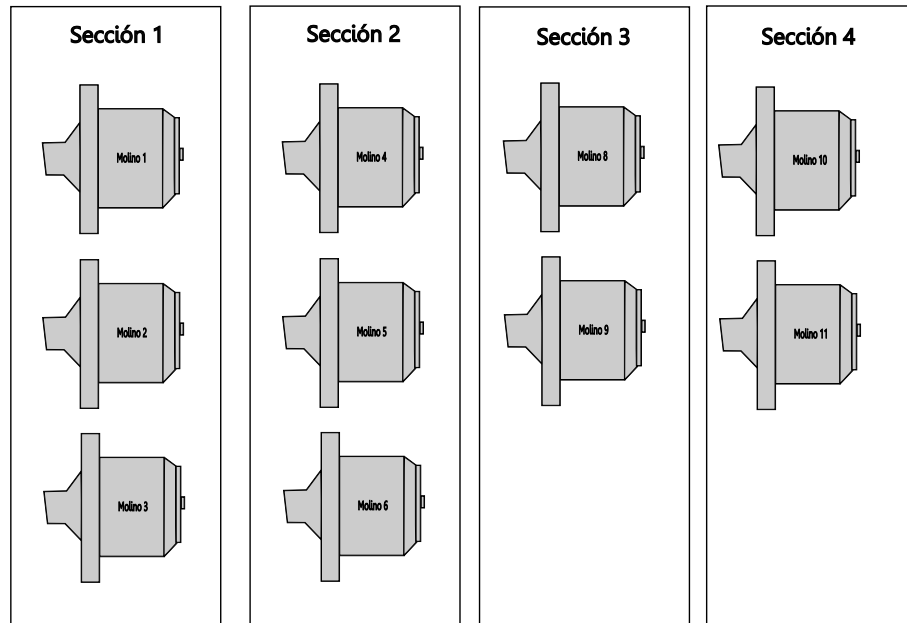


Figura 5.1: Sistema de estudio secciones Molienda Convencional

La tabla 5.1 muestra los parámetros de los motores eléctricos acoplados a los molinos del proceso. Se observa que todos tienen una partida directa y tienen valores distintos de potencia.

Molienda	Equipo	Tensión [V]	Potencia [HP]	Accionamiento	Conexión
Sección 1	Molino 1	400	737	Directa	CD 7
	Molino 2	400	500	Directa	CD 7
	Molino 3	400	750	Directa	CD 1
Sección 2	Molino 4	400	650	Directa	CD 5
	Molino 5	400	750	Directa	CD 5
	Molino 6	400	500	Directa	CD 4
Sección 3	Molino 8	400	737	Directa	CD 3
	Molino 9	400	476	Directa	CD 3
Sección 4	Molino 10	400	737	Directa	CD 6
	Molino 11	400	476	Directa	CD 6

Tabla 5.1: Motores de las secciones de Molienda Convencional.

5.2. Procesamiento de mineral en las secciones de Molienda Convencional

El procesamiento del mineral en estas secciones de Molienda se obtiene de la base de datos que maneja Control de gestión de planta. Se mide la cantidad de mineral que llega desde la correa transportadora que alimenta cada sección. La figura 5.2 muestra como se distribuye el material procesado por cada sección, donde la sección 1 y 2 tienen un 30 % del total de mineral con un orden de magnitud de 60.000 toneladas. Las secciones 3 y 4, tienen alrededor de 40.000 toneladas de mineral, representando un 20 % del total procesado cada una.

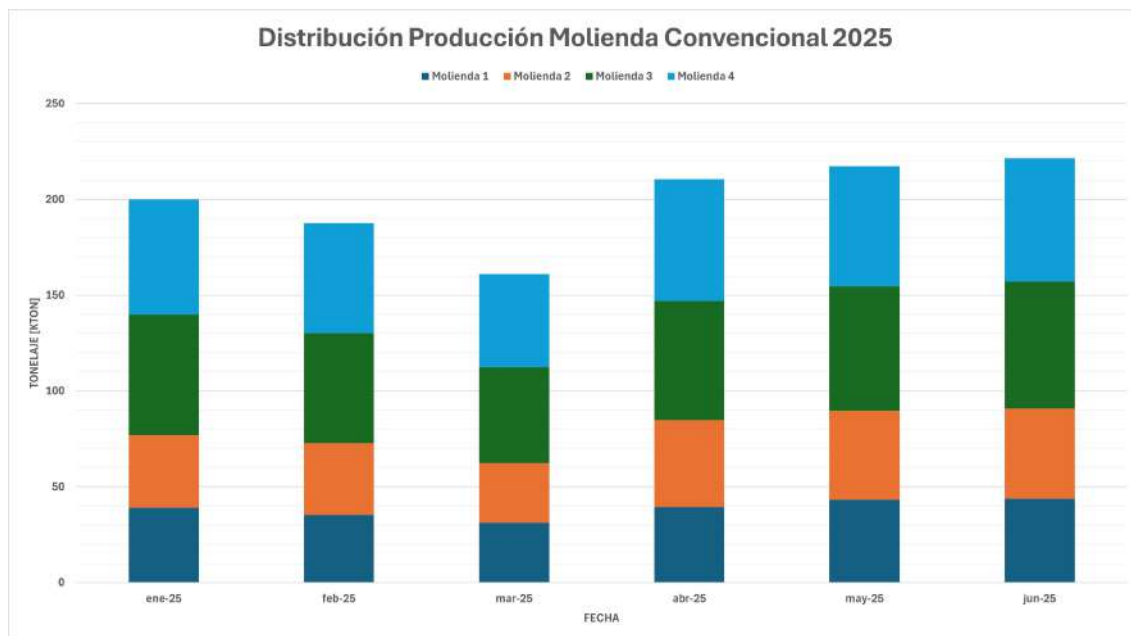


Figura 5.2: Distribución del procesamiento de mineral en las secciones de molienda convencional año 2025.

El objetivo de este capítulo es analizar el desempeño energético de cada sección al procesar esta cantidad de material. Para esto hay ciertas variables relevantes que influyen directamente en el proceso como son: horas de operación, material procesado, mantenimientos, granulometría del material, revestimientos del molino. La idea es analizar cómo está operando cada una de las secciones actualmente en comparación a un año de referencia definido como una línea base energética.

5.3. Análisis de eficiencia energética

5.3.1. Criterios de definición de la línea de base energética

La línea base toma en cuenta un periodo de tiempo adecuado que logre generar una base de información sobre el uso de energía y las variables relevantes que representan el periodo. Para esto se establece una metodología [17]:

1. El periodo debe incluir ciclos de operación normales, en los cuales no debe haber cambios tecnológicos, operativos o energéticos significativos.
2. El periodo definido debe contener pocos eventos irregulares tales como: catástrofes naturales, alteraciones operativas, mantenciones extraordinarias.
3. Retroceder a lo más un máximo de cinco años en la recopilación de información, para así no tener un escenario de operación tan diferente. Es importante que en este periodo de análisis se cuente con toda la información correspondiente.

Adicionalmente, se considera que en caso de ocurrir eventos irregulares de forma frecuente, estos deben ser incluidos en la línea base ya que pasan a ser parte de la operación normal.

5.3.2. Criterios de elección variables relevantes

En la recopilación de información para el análisis de las secciones de molienda convencional, se lograron reunir las siguientes variables: material procesado [Ton], horas operativas [Hr], work index [kWh/Ton].

La idea es obtener un modelo matemático lineal que relaciona una o más variables relevantes con el consumo eléctrico. El modelo esperado tiene la siguiente forma para “n” variables independientes:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad (5.1)$$

Para la elección de estas variables representativas se deben establecer ciertos criterios los cuales se utilizaron en la revisión energética del SGE [4]. A continuación se enumera cada uno de ellos:

1. Información completa de las variables en el periodo anual.
2. $R^2 \geq 0,75$
3. $P_{value} \leq 0,05$

5.3.3. Elección del año de línea base energética

Se hizo un recopilación de información de consumos eléctricos y procesamiento de material desde el año 2020 hasta el 2024. La figura 5.3 muestra el comportamiento del consumo eléctrico de la sección 2 de molienda, que corresponde a los molinos 4, 5 y 6, en el periodo analizado. Se tiene las siguientes observaciones:

- El año 2020 considera la pandemia por el Coronavirus que afectó a nivel global la vida de las personas. Este periodo no cumple con el criterio 2, dada la alteración operativa.
- En el año 2021 existen deficiencias en la información entregada por la empresa, dado que faltan datos de procesamiento en el mes de diciembre de ese año.
- En el año 2024 ocurrió un evento de gran relevancia en el área de Molienda Convencional. El día 28 de julio, a las 22:50 horas, se produjo un incendio que ocasionó la detención completa de la planta durante una semana. Posteriormente, la operación de Molienda Convencional se reanudó de manera parcial, manteniéndose en esa condición hasta el mes de diciembre.

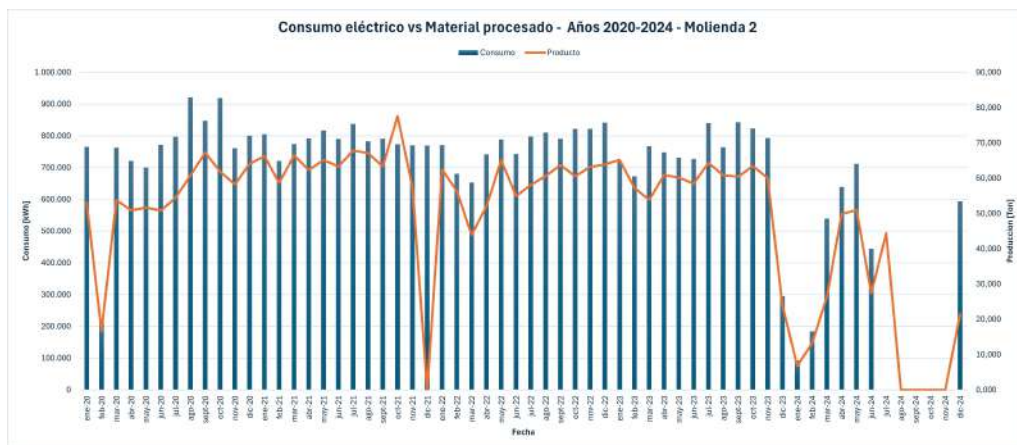


Figura 5.3: Tendencia del consumo eléctrico y material procesado en la sección 2 de Molienda Convencional.

Para el análisis de eficiencia energética se estudia el año 2023 como línea de base energética, dado que se tiene la información de los consumos, producción por sección para ese año, cumple con los criterios y es el más cercano a la actualidad. En la tabla 5.2 se presenta un resumen del cumplimiento de los criterios definidos:

Año	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
2024	No	No	Si
2023	Si	Si	Si
2022	Si	Si	Si
2021	Si	Si	Si
2020	No	No	Si

Tabla 5.2: Cumplimiento criterios año base.

5.3.4. Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2023

5.3.4.a. Molienda 1

La información recopilada para esta sección corresponde a los consumos eléctricos reales que aparecen en el estado de pago mensual de El Soldado y que es generada por el departamento de mantención eléctrica Planta. En el caso de las variables de material procesado y Work Index se obtuvieron desde la base de información que tiene Control de gestión Planta. La tabla 5.3 muestra los valores de estos parámetros para el año base 2023.

Fecha	Consumo [kWh]	Material Procesado [kTon]	H_{op} [h]	WI [kWh/ton]
ene-23	866.534	68,424	724	35
feb-23	722.421	53,035	569	43
mar-23	910.490	61,594	663	33
abr-23	890.716	65,020	670	33
may-23	857.600	59,185	660	34
jun-23	844.070	58,612	678	35
jul-23	964.320	62,549	685	33
ago-23	972.217	63,581	717	32
sept-23	933.593	62,881	673	34
oct-23	960.339	67,095	705	33
nov-23	934.669	61,677	679	34
dic-23	339.445	25,117	270	38

Tabla 5.3: Información recopilada de variables relevantes Molienda 1 año 2023.

Se realiza un análisis de regresión lineal para conocer el nivel de relación que tienen las variables relevantes propuestas con el consumo eléctrico real.

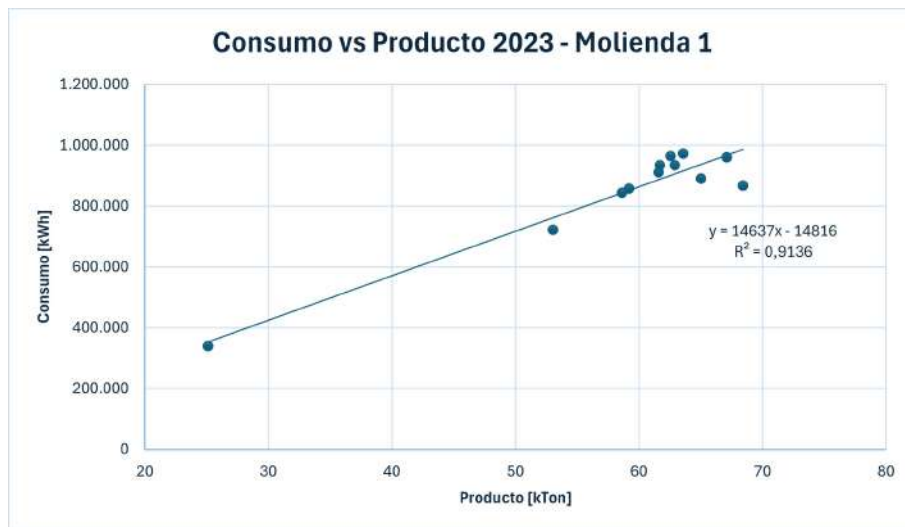


Figura 5.4: Gráfico consumos versus material procesado año 2023 - Molienda 1.

La figura 5.4 presenta un gráfico de dispersión del consumo eléctrico como variable dependiente y el material procesado por la sección 1 de molienda convencional. Se observa que hay relación lineal considerable, dado que se tiene un coeficiente R^2 igual a 0,9136.

Esto se replica para la variable de horas operativas de funcionamiento, donde se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,9372 que es mayor al caso anterior, tal como se muestra en la figura 5.5. Se evalúa el modelo matemático y se realiza una limpieza de datos con una franja de 1,5 veces el error típico, lo cual filtra el dato de enero 2023. Así, se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,9691 que mejora el modelo.



Figura 5.5: Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 1.

Por otro lado, se evalúa la variable de Work Index mensual, donde se observa que se obtiene un coeficiente R^2 de 0,4157 con el consumo eléctrico. Sin embargo, en la figura 5.6 se observa que hay un punto donde el WI tiene un valor de 38, que se aleja excesivamente de la curva. Se realiza una limpieza de datos con un factor de 1,5 veces el error típico, lo que permite que se pueda eliminar este dato y se obtenga un coeficiente R^2 de 0,799.

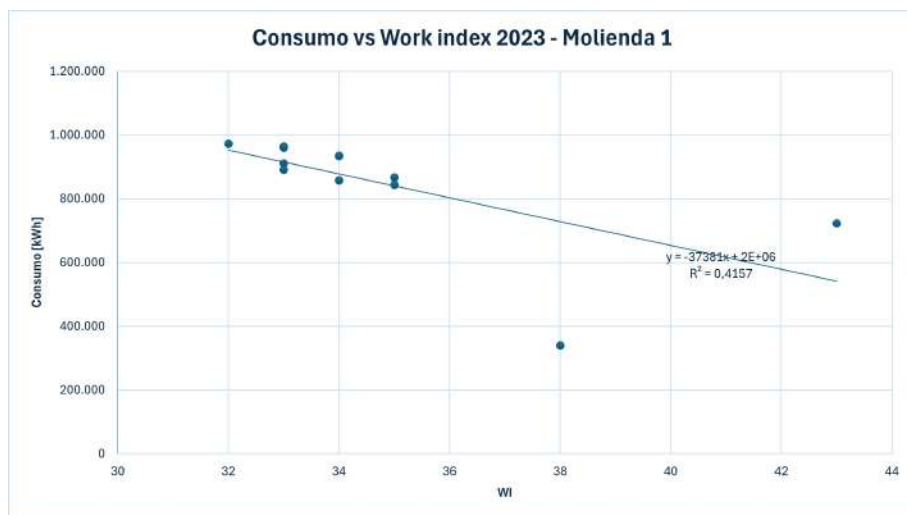


Figura 5.6: Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 1.

Finalmente se realiza una tabla resumen donde se comparan los resultados obtenidos de la regresión lineal con variables relevantes. Se incluye una relación multivariable que considera tanto el material procesado como las horas de operación.

VARIABLES	R^2	P-value β_1	P-value β_2	Cumple
Material procesado (β_1)	0,9135	1,23E-06	-	Si
Work Index (β_1)	0,799	0,0002	-	Si
Horas de operación (β_1)	0,9691	4,19E-08	-	Si
Work index(β_1) y Horas de operación(β_2)	0,9763	0,1558	7,53E-07	No
Material (β_1) y Horas (β_2)	0,9741	0,2489	0,1096	No

Tabla 5.4: Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 1.

A partir de la tabla 5.4 se concluye que la mejor relación lineal entre el consumo eléctrico y las variables relevantes estudiadas corresponde al caso que considera las horas de operación. Se obtiene el siguiente modelo matemático para la molienda 1:

$$Consumo_{mol1}[kWh] = 1429,6 \cdot H_{op} - 57538,6 \tag{5.2}$$

La figura 5.7 muestra la tendencia del consumo eléctrico real y proyectado en la sección 1. Se aprecian pequeñas variaciones entre ambas curvas; sin embargo, el comportamiento general resulta comparable.

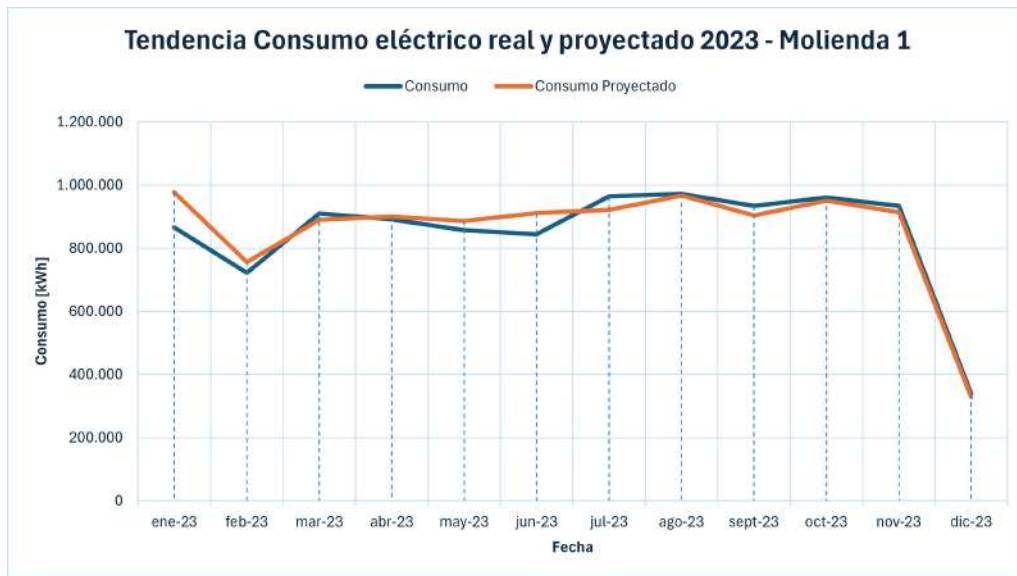


Figura 5.7: Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 1 año 2023

5.3.4.b. Molienda 2

Al igual que en el caso anterior, la información recopilada para esta sección corresponde a los consumos eléctricos reales que aparecen en el estado de pago mensual de El Soldado y las variables de material procesado y horas de operación se obtuvieron desde la base de información que tiene Control de gestión Planta. La tabla 5.5 muestra los valores de estos parámetros para el año base 2023.

Fecha	Consumo [kWh]	Material Procesado [kTon]	H_{op} [h]	WI [kWh/ton]
ene-23	721.288	65,171	712	35
feb-23	672.266	57,240	638	43
mar-23	767.356	53,858	651	33
abr-23	747.826	60,891	671	33
may-23	731.422	60,139	700	34
jun-23	727.309	58,469	691	35
jul-23	839.965	64,333	714	33
ago-23	764.019	60,853	713	32
sept-23	842.920	60,403	684	34
oct-23	823.148	63,427	706	33
nov-23	793.152	60,035	687	34
dic-23	294.912	23,879	278	38

Tabla 5.5: Información recopilada de variables relevantes Molienda 2 año 2023.

Al igual que para el caso de molienda 1 se realiza una regresión lineal para evaluar las variables relevantes. La figura 5.8 presenta un gráfico de dispersión del consumo eléctrico como variable dependiente y el material procesado por la sección 2 de molienda convencional. Se observa que hay relación lineal considerable, dado que se tiene un coeficiente R^2 igual a 0,8685.

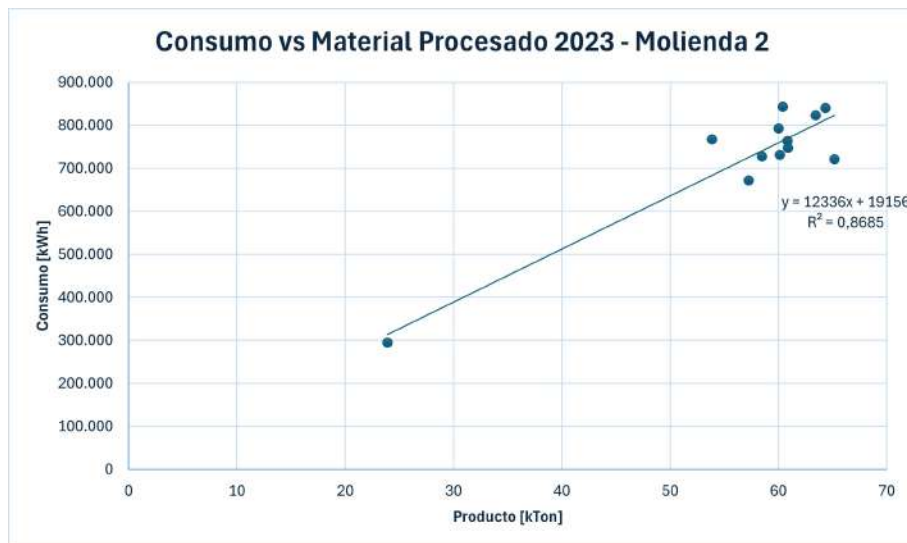


Figura 5.8: Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 2.

Esto se replica para la variable de horas operativas de funcionamiento, donde se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,9372 que es mayor al caso anterior, tal como se muestra en la figura 5.9.

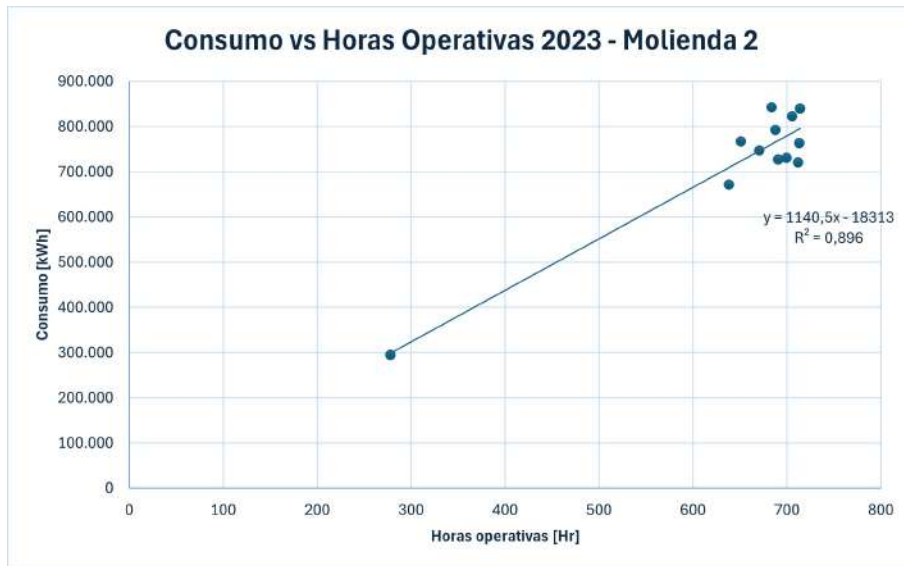


Figura 5.9: Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 2.

Por otro lado, en la figura 5.10 se evalúa la variable de Work Index, que al igual que en el caso de la molienda 1 se realiza una limpieza de datos y se elimina el punto con un WI igual a 38. Se obtiene un coeficiente R^2 de 0,799 que mejora la linealidad respecto a la base de datos completa.

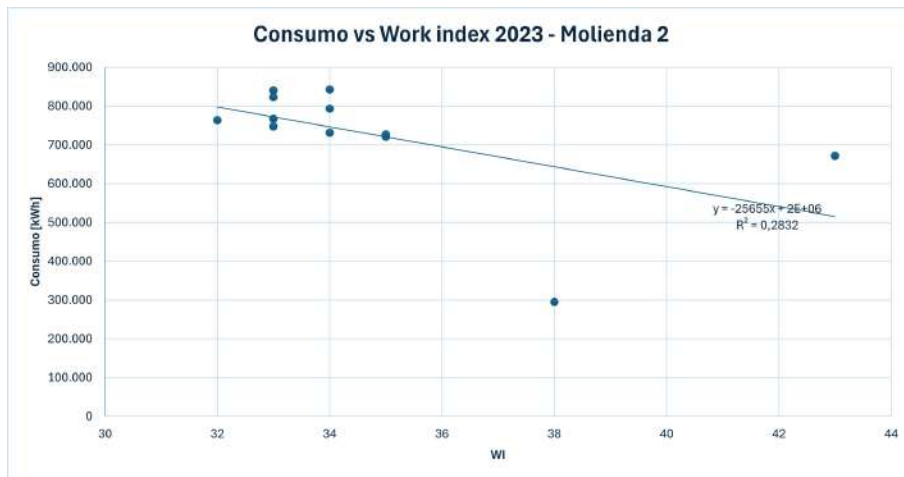


Figura 5.10: Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 2.

Finalmente se realiza una tabla resumen donde se comparan los resultados obtenidos de la regresión lineal con variables relevantes. Se incluye una relación multivariable que considera tanto el material procesado como las horas de operación y una relación entre el Work index y las horas de operación.

Variables	R^2	P-value β_1	P-value β_2	Cumple
Material procesado (β_1)	0,9469	2,21E-06	-	Si
Work Index (β_1)	0,4117	0,0318	-	No
Horas de operación (β_1)	0,9225	2,68E-06	-	Si
Material (β_1) y Horas (β_2)	0,896	0,952	0,1564	No

Tabla 5.6: Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 2.

A partir de la tabla 5.6 se concluye que la mejor relación lineal entre el consumo eléctrico y las variables relevantes estudiadas corresponde a el caso que considera el material procesado. Se obtiene el siguiente modelo matemático para la molienda 2:

$$Consumo_{mol2}[kWh] = 13209,2 \cdot kTon - 28792,7 \tag{5.3}$$

Al evaluar el modelo matemático se obtiene el comportamiento de la figura 5.11.

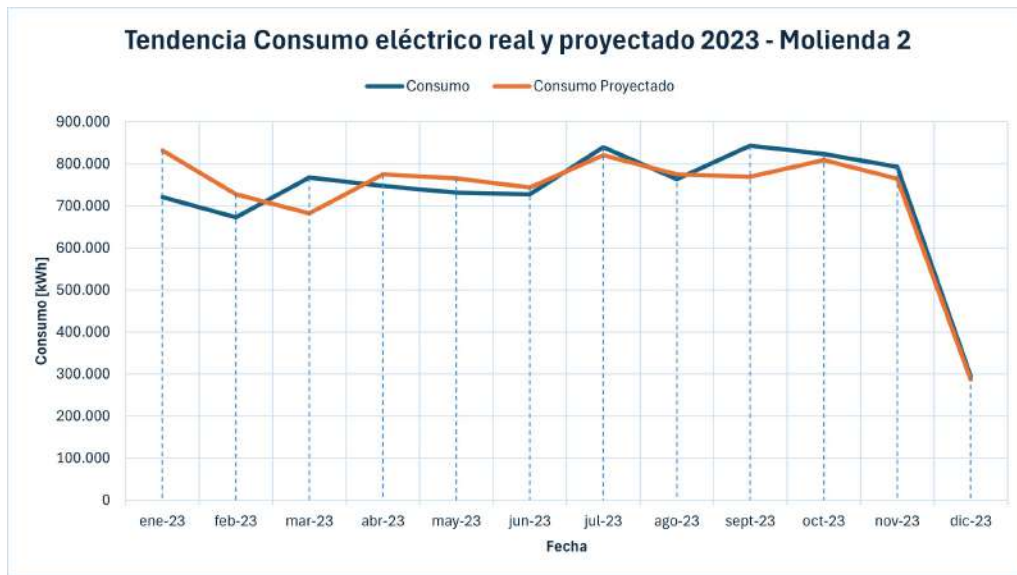


Figura 5.11: Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 2 año 2023

5.3.4.c. Molienda 3

Se continúa con el análisis realizado en las secciones anteriores. La tabla 5.7 muestra los valores de estos parámetros para el año base 2023.

Fecha	Consumo [kWh]	Material Procesado [kTon]	H_{op} [h]	WI [kWh/ton]
ene-23	513.794	73,232	696	35
feb-23	500.583	67,834	645	43
mar-23	569.553	70,176	664	33
abr-23	544.442	67,544	654	33
may-23	556.004	75,276	707	34
jun-23	533.894	72,712	699	35
jul-23	607.081	77,169	709	33
ago-23	600.099	67,578	719	32
sept-23	570.902	70,538	672	34
oct-23	611.125	77,094	720	33
nov-23	589.105	68,181	690	34
dic-23	256.316	29,058	270	38

Tabla 5.7: Información recopilada de variables relevantes Molienda 3 año 2023.

Se realiza un análisis para evaluar la linealidad entre el consumo eléctrico y las variables relevantes mencionadas.

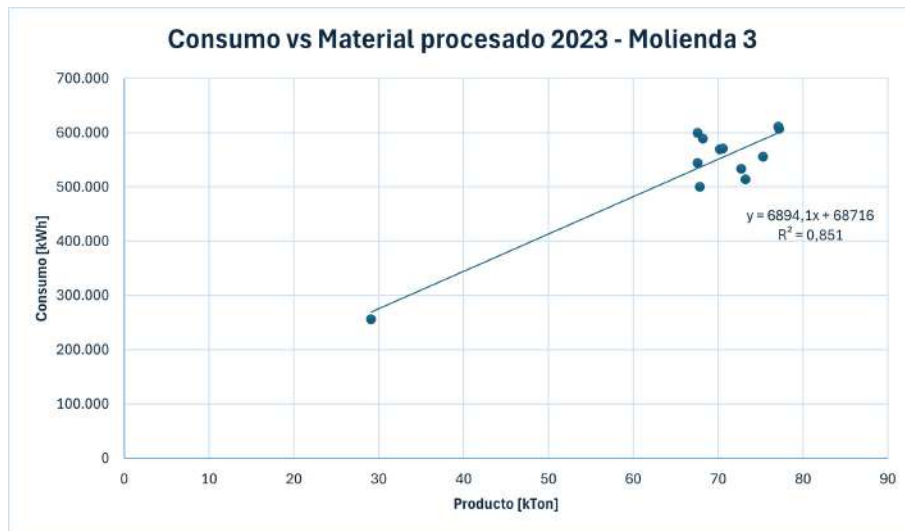


Figura 5.12: Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 3.

La figura 5.12 presenta un gráfico de dispersión del consumo eléctrico como variable dependiente y el material procesado por la sección 2 de molienda convencional. Se observa que hay relación lineal considerable, dado que se tiene un coeficiente R^2 igual a 0,8685 que es mayor al 0,75 establecido como criterio.

Esto se replica para la variable de horas operativas de funcionamiento, donde se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,896 que es mayor al caso anterior, tal como se muestra en la figura 5.13.



Figura 5.13: Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 3.

En la figura 5.14 se evalúa la variable de Work index mensual, donde se observa que no hay una relación lineal con el consumo eléctrico ya que el coeficiente R^2 tiene un valor de 0,3197 menor al fijado en el criterio. Se realiza la limpieza de datos, donde se elimina el valor de diciembre 2023 y se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,5109.

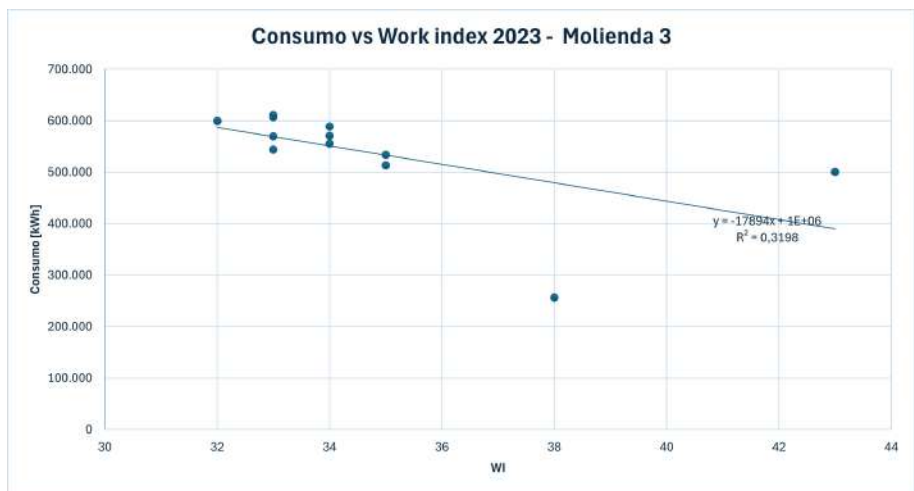


Figura 5.14: Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 3.

Finalmente se realiza una tabla resumen donde se comparan los resultados obtenidos de la regresión lineal con variables relevantes. Se incluye una relación multivariable que considera tanto el material procesado y Work Index respecto a las horas de operación.

VARIABLES	R^2	P-value β_1	P-value β_2	Cumple
Material procesado (β_1)	0,9267	8,13E-06	-	Si
Work Index (β_1)	0,5109	0,0134	-	No
Horas de operación (β_1)	0,9426	6,84E-07	-	Si
Material (β_1) y Horas (β_2)	0,9429	0,864	0,025	No

Tabla 5.8: Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 3.

A partir de la tabla 5.8 se concluye que la mejor relación lineal entre el consumo eléctrico y las variables relevantes estudiadas corresponde a el caso que considera las horas de operación y que tiene un coeficiente R^2 mayor a los otros casos. Se obtiene el siguiente modelo matemático para la molienda 3:

$$Consumo_{mol3}[kWh] = 754,3 \cdot H_{op} + 49649,9 \tag{5.4}$$

Al evaluar el modelo matemático se obtiene la tendencia del consumo eléctrico presentado en la figura 5.15.

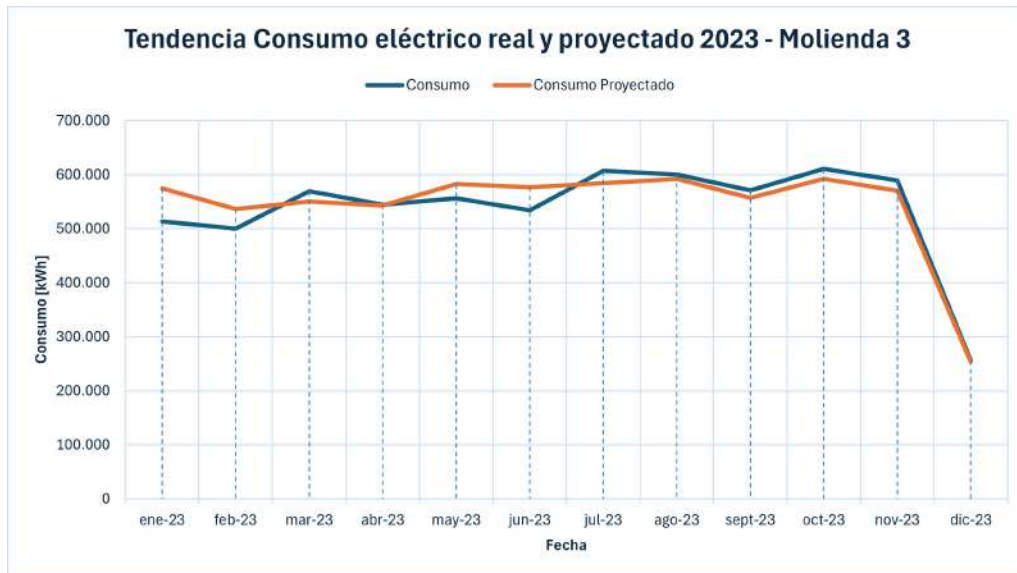


Figura 5.15: Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 3 año 2023

5.3.4.d. Molienda 4

Se continúa con el análisis realizado en las secciones anteriores. La tabla 5.9 muestra los valores de estos parámetros para el año base 2023.

Fecha	Consumo [kWh]	Material Procesado [kTon]	H_{op} [h]	WI [kWh/ton]
ene-23	524.663	77,060	700	35
feb-23	508.299	70,930	650	43
mar-23	564.583	70,799	670	33
abr-23	591.377	69,743	691	33
may-23	602.166	75,635	728	34
jun-23	469.720	75,081	688	35
jul-23	598.037	79,393	721	33
ago-23	562.416	65,270	713	32
sept-23	488.065	69,265	687	34
oct-23	569.552	73,522	718	33
nov-23	588.008	67,307	688	34
dic-23	258.295	27,164	271	38

Tabla 5.9: Información recopilada de variables relevantes Molienda 4 año 2023.

Se realiza un análisis para evaluar la linealidad entre el consumo eléctrico y las 3 variables relevantes mencionadas.



Figura 5.16: Gráfico consumos versus producto año 2023 - Molienda 4.

La figura 5.16 presenta un gráfico de dispersión del consumo eléctrico como variable dependiente y el material procesado por la sección 2 de molienda convencional. Se observa que hay relación lineal considerable, dado que se tiene un coeficiente R^2 igual a 0,7176 que es menor al valor de 0,75 establecido como criterio.

Esto se replica para la variable de horas operativas de funcionamiento, donde se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,8368 que es mayor al caso anterior, tal como se muestra en la figura 5.17.

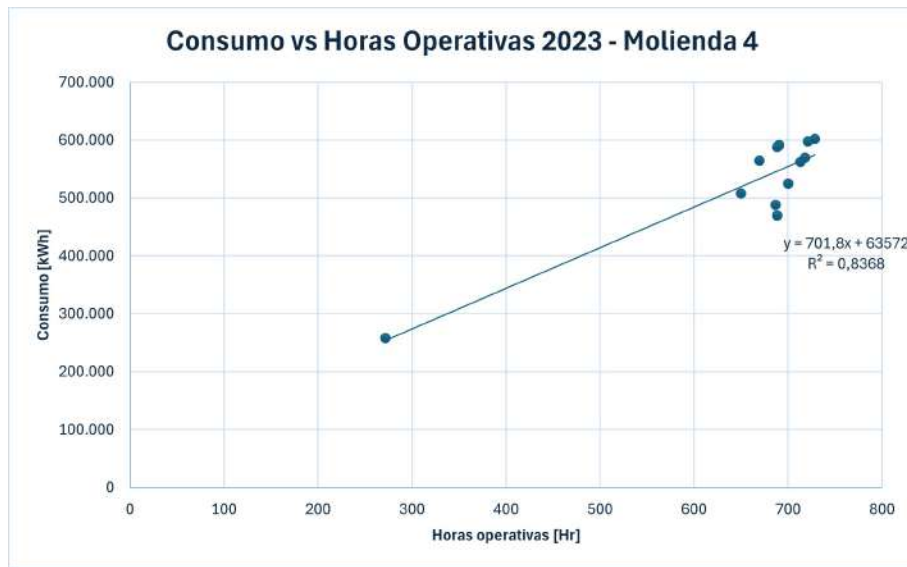


Figura 5.17: Gráfico consumos versus horas de operación año 2023 - Molienda 4.

En la figura 5.18 se evalúa la variable Work Index, donde se observa que no hay una relación lineal con el consumo eléctrico ya que el coeficiente R^2 tiene un valor de 0,212, con la data filtrada (se eliminó el valor de 38), menor al fijado en el criterio.

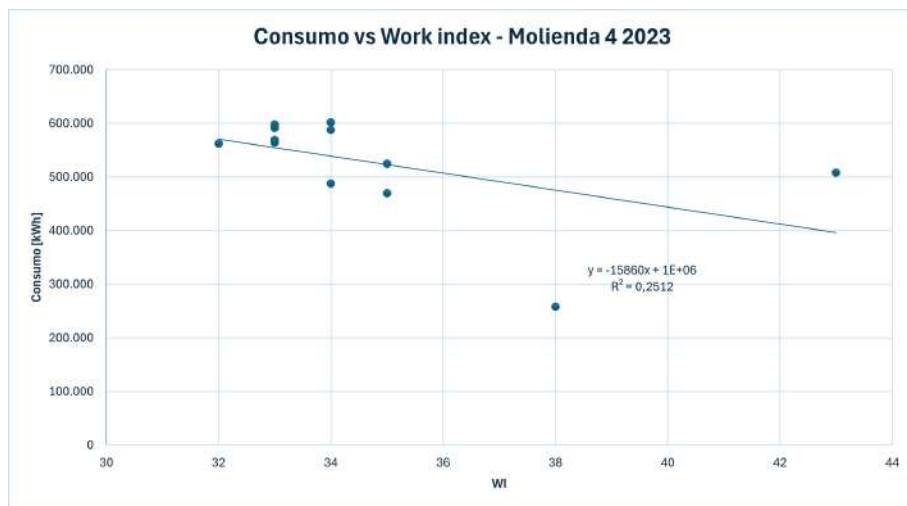


Figura 5.18: Gráfico consumos versus Work index año 2023 - Molienda 4.

Finalmente se realiza una tabla resumen donde se comparan los resultados obtenidos de la regresión lineal con variables relevantes. Se incluye una relación multivariable que considera tanto el material procesado y Work index respecto a las horas de operación.

VARIABLES	R^2	P-value β_1	P-value β_2	Cumple
Material procesado (β_1)	0,8153	0,0014	-	Si
Work Index (β_1)	0,212	0,154	-	No
Horas de operación (β_1)	0,8977	9,43E-06	-	Si
Material (β_1) y Horas (β_2)	0,9475	0,5455	0,0075	No

Tabla 5.10: Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda 4.

A partir de la tabla 5.10 se concluye que la mejor relación lineal entre el consumo eléctrico y las variables relevantes estudiadas corresponde al caso que considera las horas de operación y que tiene un coeficiente R^2 de 0,8977. Si bien este modelo tiene un menor coeficiente de regresión lineal respecto al caso multivariable que relaciona material y horas, éste último no cumple con todos los criterios fijados. Se obtiene el siguiente modelo matemático para la molienda 4:

$$Consumo_{mol4}[kWh] = 715,6 \cdot H_{op} + 61510,9 \tag{5.5}$$

Finalmente, se realiza una comparación entre el consumo eléctrico real y el consumo eléctrico generado por el modelo matemático. En la figura 5.19 observa que sigue un comportamiento similar, con algunas diferencias en periodos de bajo consumo.

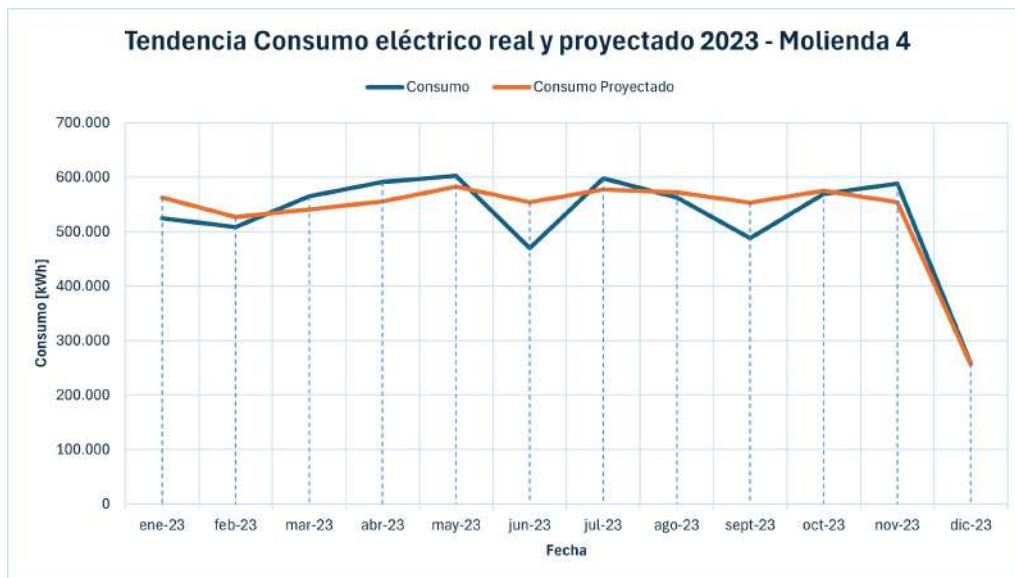


Figura 5.19: Comparación del consumo real y consumo modelo Molienda 4 año 2023

5.3.5. Desempeño energético Molienda 1

5.3.5.a. Año 2024

Como contexto de operación, se produjo un incendio aproximadamente a las 22:50 del día 28 de julio que comprometió la sección 2 de la molienda convencional. La planta completa estuvo detenida por una semana, y recién en diciembre de ese año se volvió a la normalidad en la sección 2.

Dado lo anterior, la distribución de energía de los meses de Julio y Agosto de 2024 no tienen un valor real, ya que en Julio, si bien hubo producción, no quedó el registro de la medición de energía. Mientras que el valor de energía en Agosto llega a 958.883 [kWh] lo que se ve fuera de rango, dado que incluye el mes anterior. Por esta razón, se utilizará el valor del consumo eléctrico obtenido desde el modelo para el mes de agosto y la diferencia con el valor real corresponderá al mes de julio. Esto con la finalidad de que pueda realizarse un análisis en los meses de Julio y Agosto.

La tabla 5.11 presenta los valores del consumo eléctrico real, el material procesado y las horas operativas de la sección 1 por mes para el año 2024.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-24	449.786	28,532	306,3	41,2 %
feb-24	676.812	43,638	462,7	66,5 %
mar-24	813.655	53,899	587,5	79,0 %
abr-24	606.250	45,739	500,6	69,4 %
may-24	506.397	47,278	512,7	68,9 %
jun-24	461.010	27,511	321,5	44,6 %
jul-24	663.785	44,222	508,7	68,4 %
ago-24	295.098	22,165	258,8	34,8 %
sept-24	682.957	52,210	563,1	78,3 %
oct-24	815.902	45,516	506,0	68,0 %
nov-24	768.434	49,854	540,0	75,0 %
dic-24	830.013	46,306	505,4	67,9 %

Tabla 5.11: Parámetros de eficiencia energética Molienda 1 2024.

Con la finalidad de observar el comportamiento del indicador de desempeño energético mensual de la sección 1 de molienda convencional, se realiza el gráfico comparativo de la figura 5.20 donde se incluye el IDE que relaciona el consumo eléctrico obtenido desde el modelo de la ecuación 5.2. Además se incluye en Operating Time (OT) que relaciona las horas de operación con las horas programadas, en esta sección este valor se mueve en un rango entre el 41,2 % y el 79 %.

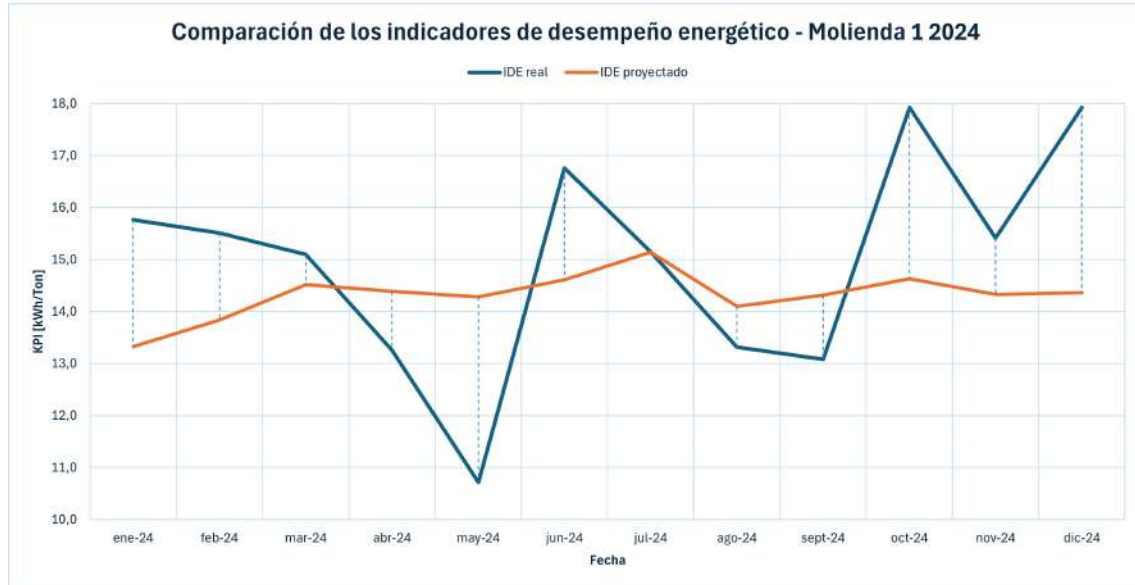


Figura 5.20: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 1 año 2024.

Tal como se observa en la figura 5.20 hay siete meses en los que el IDE real se encuentra sobre lo que según el modelo debería haber consumido. La tabla 5.12 presenta la variación porcentual de los indicadores, donde el mes de diciembre alcanzó un 20 % sobre el indicador de desempeño energético esperado.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-24	15,8	13,3	18,8 %
feb-24	15,5	13,8	12,3 %
mar-24	15,1	14,5	4,1 %
abr-24	13,3	14,4	-7,6 %
may-24	10,7	14,3	-25,2 %
jun-24	16,8	14,6	15,1 %
jul-24	15,1	15,1	0,0 %
ago-24	13,3	14,1	-5,7 %
sept-24	13,1	14,3	-8,4 %
oct-24	17,9	14,6	22,6 %
nov-24	15,4	14,3	7,7 %
dic-24	17,9	14,4	24,3 %

Tabla 5.12: Comparación corregida de los IDE real y proyectado en Molienda 1, año 2024.

5.3.5.b. Año 2025

Luego del evento ocurrido en el año 2024, se normalizó la situación y durante los meses de este año hubo una operación normal. Se presentan los valores de las variables relevantes e indicadores en la tabla 5.13.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-25	483.289	39,186	462	62,1 %
feb-25	552.766	35,347	420	62,5 %
mar-25	461.851	31,163	410	55,1 %
abr-25	660.069	39,398	481	66,8 %
may-25	722.957	43,270	546	73,4 %
jun-25	635.471	43,765	506	70,3 %

Tabla 5.13: Parámetros de eficiencia energética Molienda 1 2025.

Se observa en la figura 5.21 que, en general, el IDE real se encuentra bajo lo obtenido con el modelo matemático. Esto indica que se consumió menos energía eléctrica para procesar esa cantidad de material por la sección 1.

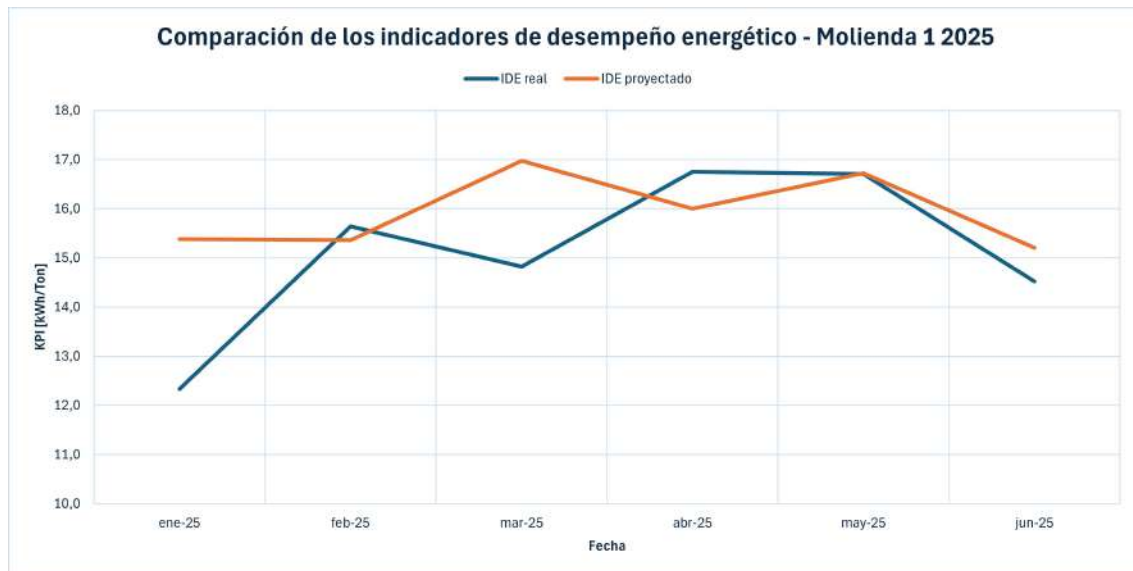


Figura 5.21: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 1 año 2025.

La tabla 5.14 presenta los valores de las variaciones entre ambos indicadores, donde se tiene que hay dos meses (febrero y abril) donde el IDE real superó al modelo, lo que se interpreta como una ineficiencia.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-25	12,3	15,38	-20,0 %
feb-25	15,6	15,36	1,6 %
mar-25	14,8	16,98	-12,9 %
abr-25	16,8	16,00	5,0 %
may-25	16,7	16,72	-0,1 %
jun-25	14,5	15,21	-4,7 %

Tabla 5.14: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 1 año 2025.

5.3.5.c. Operación

En esta sección se realiza un análisis de la operación de los molinos de bolas de la molienda convencional utilizando los medidores en línea que se implementaron en el mes de Junio donde se calibró el equipo. El primer mes con una base de datos es el mes de Julio, donde se utilizó la potencia del motor en el tiempo para establecer los dos estados de operación. La figura 5.22 muestra la operación de la sección 1 de molienda convencional, la cual corresponde a los molinos 1, 2 y 3. Se observa que durante el mes de Julio se tiene un gran número de variaciones en el estado de operación, que según la tabla 5.15 los molinos 1 y 2 tienen 37 arranques en el mes, mientras que el molino 3 llega a 37 partidas. Estos equipos son con partida directa por lo que la repetitiva detención y arranque del equipo genera un impacto tanto en sus componentes eléctricos como mecánicos.

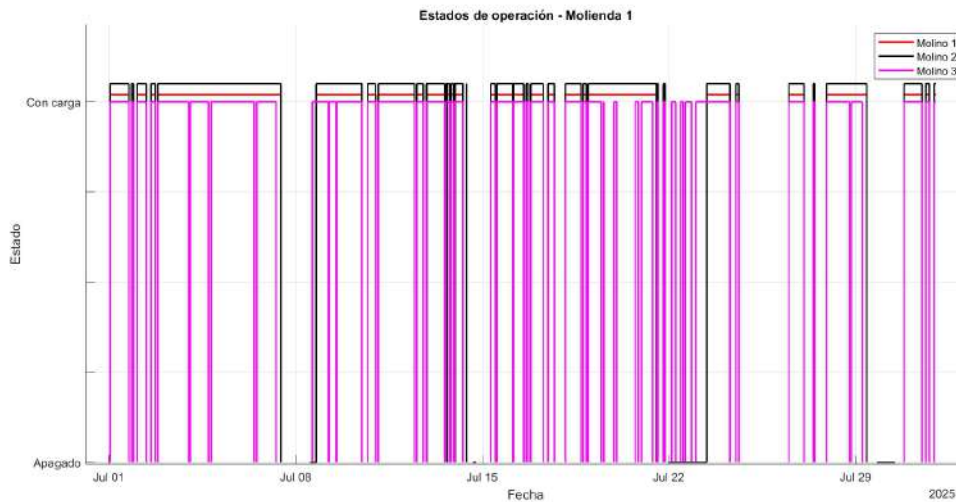


Figura 5.22: Estados de operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025

Además, es posible calcular la cantidad de horas de operación que tienen los molinos. Se tiene que en general se encuentran operando alrededor del 65 % del tiempo. La tabla 5.15 muestra el resumen de la operación de la sección 1 en el mes de julio.

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 1	37	483,2	260,7	65,0 %
Molino 2	37	482,4	261,5	64,8 %
Molino 3	47	457,9	286,1	61,5 %

Tabla 5.15: Resumen operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025

En la tabla 5.16 se replica el análisis para el mes de agosto del 2025 con la finalidad de contar con más información acerca de la operación de esta molienda.

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 1	29	467,9	276,0	62,9 %
Molino 2	38	466,6	277,4	62,7 %
Molino 3	38	475,1	268,9	63,9 %

Tabla 5.16: Resumen operación Sección 1 Molienda Convencional. Mes de agosto 2025

Para tener un antecedente e interpretar el bajo porcentaje de operación de la sección 1 de molienda convencional en los años 2024 y 2025 se incluye el año 2023 que corresponde a la línea base utilizada. Se observa en la figura 5.23 que en el año 2023 se tenía un OT de alrededor del 90 %, el cual disminuyó en los años siguientes. Se consultó con mantención planta del porqué ocurrió esta situación, y se averiguó que desde finales del año 2023 la sección 3 del chancado se detuvo permanentemente. Esta sección alimentaba directamente a las molineras 1 y 2 con material fino, actualmente se alimenta desde el SAG y chancado secundario. El chancado entra en mantención 2 veces al mes, y además la cuba que alimenta a las secciones 1 y 2 tiene una baja capacidad. Esto provoca que estas secciones se detengan al no tener material para procesar.



Figura 5.23: Operación molienda 1 durante los años 2023, 2024 y 2025.

5.3.6. Desempeño energético Molienda 2

5.3.6.a. Año 2024

Tal como se comentó anteriormente, esta fue la sección afectada por el incendio. No se tiene el registro de la energía utilizada en el mes de Julio, por lo tanto no hay un indicador KPI real para este mes. Sin embargo, al igual que en la otra sección se incluye el consumo eléctrico del modelo matemático para el mes de Julio. En los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre esta sección de molienda convencional estuvo detenida. La tabla 5.17 presenta los parámetros para analizar el desempeño energético en el año 2024.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-24	92.125	6,767	81,5	11,0 %
feb-24	183.814	13,237	211,1	30,3 %
mar-24	539.729	26,333	434,9	58,5 %
abr-24	639.265	49,819	574,6	79,7 %
may-24	711.802	50,998	597,5	80,3 %
jun-24	443.937	27,318	341,4	47,4 %
jul-24	593.772	44,399	535,6	72,0 %
ago-24	0	0,000	0,0	0,0 %
sept-24	0	0,000	0,0	0,0 %
oct-24	0	0,000	0,0	0,0 %
nov-24	0	0,000	0,0	0,0 %
dic-24	327.031	21,399	300,8	40,4 %

Tabla 5.17: Parámetros de eficiencia energética Molienda 2 2024.

Durante este año y previo al incendio que afectó esta sección de la molienda convencional se tiene un IDE real mayor al IDE proyectado, tal como se muestra en la figura 5.24, lo que indica que no fue un periodo eficiente desde el consumo eléctrico.

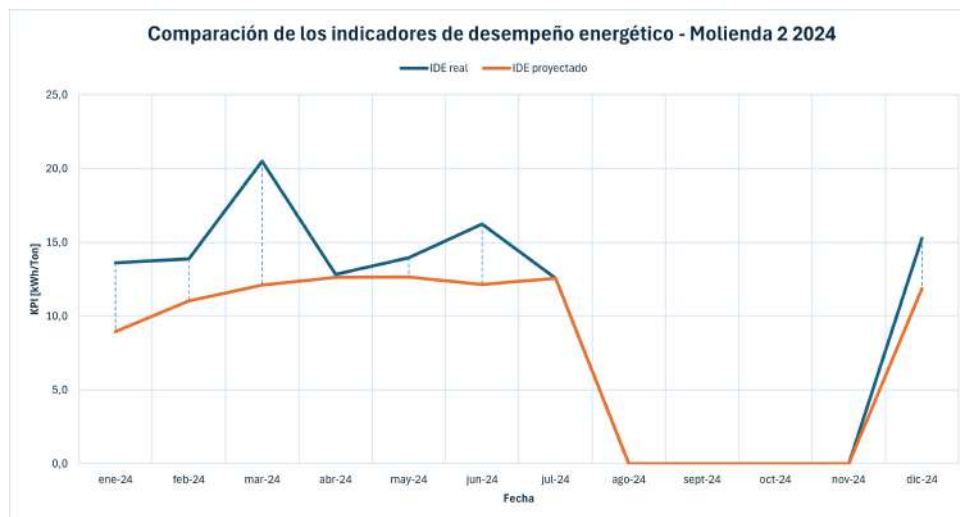


Figura 5.24: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 2 año 2024.

La tabla 5.18 presenta los valores de la variación del IDE real respecto al IDE proyectado. Se tiene que el mes de marzo se consumió un 40 % sobre el valor esperado. Además, se observa que en todos los meses hay variaciones considerables que muestran un mal desempeño energético durante este año.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-24	13,6	9,0	51,1 %
feb-24	13,9	11,0	26,4 %
mar-24	20,5	12,1	69,4 %
abr-24	12,8	12,6	1,6 %
may-24	14,0	12,6	11,1 %
jun-24	16,3	12,2	33,6 %
jul-24	12,6	12,6	0,0 %
ago-24	-	-	-
sept-24	-	-	-
oct-24	-	-	-
nov-24	-	-	-
dic-24	15,3	11,9	28,6 %

Tabla 5.18: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 2 año 2024.

5.3.6.b. Año 2025

En este año ya se normalizó la situación provocada por el incendio. La tabla 5.19 presenta los parámetros de las variables relevantes y los indicadores de operación y desempeño energético.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-25	675.431	37,805	503	67,5 %
feb-25	493.284	37,311	455	67,7 %
mar-25	480.635	31,123	457	61,4 %
abr-25	646.989	45,331	571	79,2 %
may-25	683.931	46,413	615	82,7 %
jun-25	616.750	47,146	578	80,3 %

Tabla 5.19: Parámetros de eficiencia energética Molienda 2 2025.

Durante este año el indicador de desempeño energético real tiene un valor mayor al indicador que se obtiene con el consumo eléctrico del modelo matemático. Esto se puede observar en la figura 5.25 y se interpreta como un mayor gasto de energía que lo esperado dado la cantidad de material procesado que entra como variable al modelo del consumo.

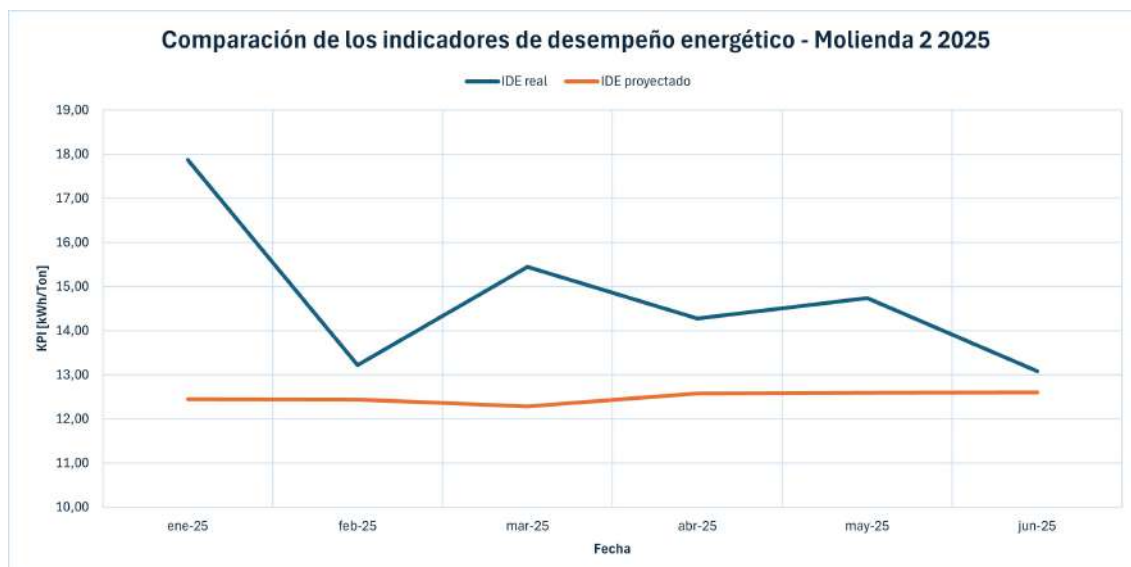


Figura 5.25: Comparación Indicador de desempeño energético real y modelo Molienda 2 año 2025.

La tabla 5.20 indica que en el mes de enero se alcanzó la mayor variación del IDE real respecto al IDE proyectado donde se llegó a un valor del 43,5%. Todas las variaciones tienen un valor positivo concordando con el gráfico de la figura 5.25 que tiene la curva del IDE real sobre el IDE proyectado en todos los meses. Durante este año se tiene que la molienda 2 es ineficiente desde el punto de vista del consumo energético.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-25	17,87	12,45	43,5 %
feb-25	13,22	12,44	6,3 %
mar-25	15,44	12,28	25,7 %
abr-25	14,27	12,57	13,5 %
may-25	14,74	12,59	17,1 %
jun-25	13,08	12,60	3,8 %

Tabla 5.20: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 2 año 2025.

5.3.6.c. Operación

En este caso se tiene a la sección 2 de molienda convencional, la cual se compone de los: Molino 4 , Molino 5 y Molino 6. La figura 5.26 muestra la operación de los 3 molinos en el mes de Julio, se observa que tienen un comportamiento similar. Esto se complementa con las tablas 5.21 y 5.22 correspondientes a los meses de julio y agosto, respectivamente, donde se incluye la cantidad de arranques que tiene cada uno de los molinos, donde el 4 y 5 tienen 21 arranques mientras que el molino 6 tiene 26. Además, operan alrededor de las 500 horas lo que se traduce en un 68 % de operación mensual.



Figura 5.26: Estados de operación Sección 2 Molienda Convencional.

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 4	21	510,4	233,5	68,6 %
Molino 5	21	510,9	233,0	68,7 %
Molino 6	26	498,7	245,2	67,0 %

Tabla 5.21: Resumen operación Sección 2 Molienda Convencional mes de julio.

Se agrega el mes de agosto en el análisis de la operación, obteniendo:

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 4	19	619,0	125,0	83,2 %
Molino 5	19	619,9	124,1	83,3 %
Molino 6	20	616,9	127,1	82,9 %

Tabla 5.22: Resumen operación Sección 2 Molienda Convencional mes de agosto.

Al igual que en el caso de la sección 1 se observa que la operación de la molienda 2 vista en la figura 5.27 decae desde el año 2024. La operación de la sección 2 durante el año 2025 ronda el 60 % y cuando opera no lo hace de forma eficiente dado el analisis en los indicadores de desempeño energético.



Figura 5.27: Operación molienda 2 durante los años 2023, 2024 y 2025.

5.3.7. Desempeño energético Molienda 3

5.3.7.a. Año 2024

Durante el año 2024 la sección 3 de molienda convencional tuvo una operación normal excepto los meses de julio y agosto debido al evento en la molienda 2. Hay que tener en cuenta que la sección 3 tiene 2 molinos de bolas, es decir, un molino menos que las secciones 1 y 2. Sin embargo, el material procesado es igual o mayor. La tabla 5.23 presenta los valores a utilizar.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-24	609.107	71,181	719,9	96,8 %
feb-24	502.424	62,776	648,8	93,2 %
mar-24	528.121	66,313	681,2	91,6 %
abr-24	531.220	64,358	672,1	93,2 %
may-24	550.121	62,350	708,2	95,2 %
jun-24	393.932	42,835	481,1	66,8 %
jul-24	487.687	55,776	578,8	77,8 %
ago-24	394.375	57,085	587,0	78,9 %
sept-24	524.967	65,838	687,1	95,6 %
oct-24	677.374	69,898	714,9	96,1 %
nov-24	615.057	64,266	663,9	92,2 %
dic-24	647.787	65,343	709,8	95,4 %

Tabla 5.23: Parámetros de eficiencia energética Molienda 3 2024.

El IDE real de la sección 3 de molienda tiene el comportamiento mostrado en la figura 5.28. Se observa que el indicador de desempeño energético real tiene un valor mayor al proyectado, lo que indica que hubo un mayor consumo de energía para procesar tal cantidad de material.

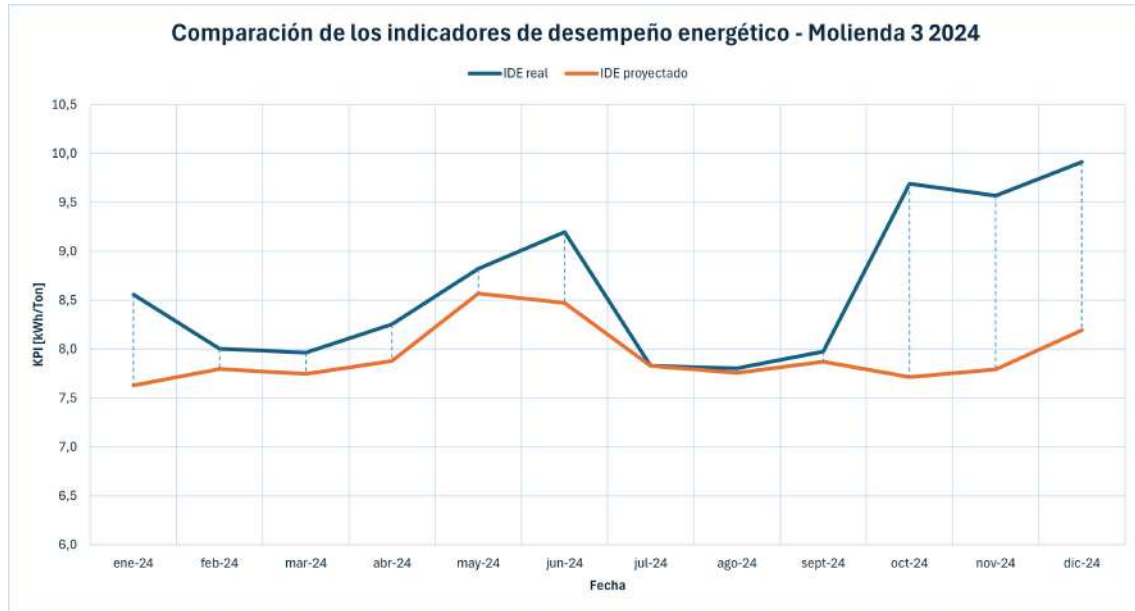


Figura 5.28: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 3 año 2024.

La tabla 5.24 presenta los valores del sobrepaso que tiene el IDE real respecto al IDE proyectado. Se alcanza un peak en los meses de octubre, noviembre y diciembre donde se ronda al 20 % de variación, siendo esos meses los más ineficientes.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-24	8,6	7,6	13,2 %
feb-24	8,0	7,8	2,6 %
mar-24	8,0	7,7	3,9 %
abr-24	8,3	7,9	5,1 %
may-24	8,8	8,6	2,3 %
jun-24	9,2	8,5	8,2 %
jul-24	7,8	7,8	0,0 %
ago-24	7,8	7,8	0,0 %
sept-24	8,0	7,9	1,3 %
oct-24	9,7	7,7	26,0 %
nov-24	9,6	7,8	23,1 %
dic-24	9,9	8,2	20,7 %

Tabla 5.24: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 3 año 2024.

5.3.7.b. Año 2025

Para el año 2025 la situación se normaliza en la sección 2, lo que permite un funcionamiento regular de las otras secciones. La tabla 5.25 presenta los parámetros a utilizar en este análisis.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-25	401.885	62,852	651	87,6 %
feb-25	486.105	57,464	613	91,2 %
mar-25	439.753	50,218	565	75,9 %
abr-25	527.251	62,232	651	90,3 %
may-25	553.194	65,044	710	95,4 %
jun-25	517.945	66,241	658	91,4 %

Tabla 5.25: Parámetros de eficiencia energética Molienda 3 2025.

Al contrario del año 2024, el desempeño energético mensual fue mejor en todo el periodo que el esperado según el modelo. Lo que indica que se encuentra operando de forma eficiente tal como se muestra en la figura 5.29.

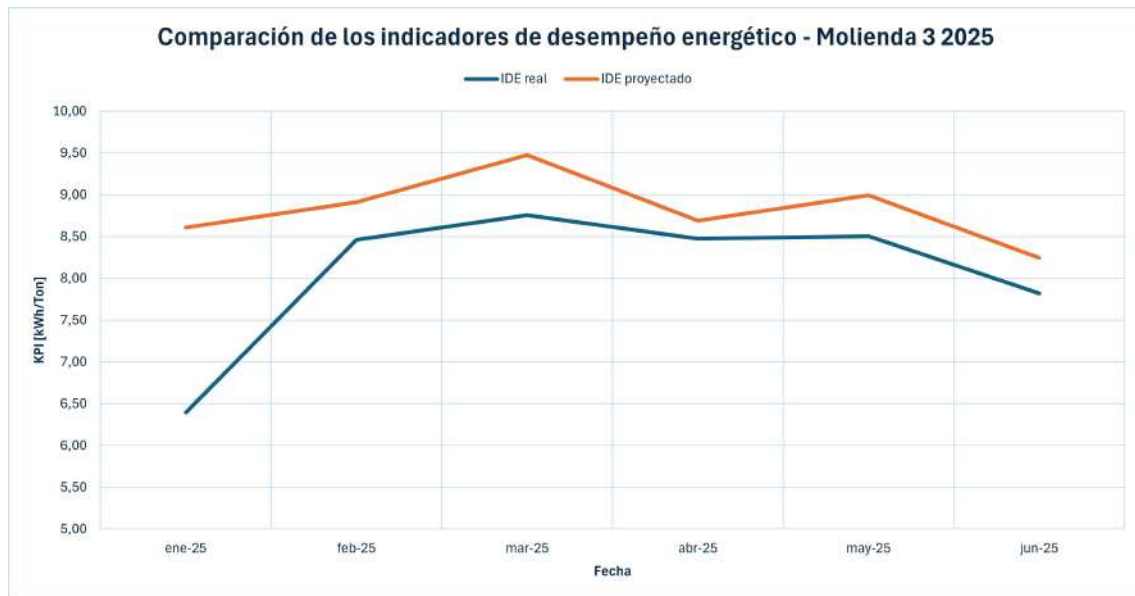


Figura 5.29: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 3 año 2025.

La tabla 5.26 presenta las variaciones entre los indicadores de desempeño. Se observa que el punto con mayor distancia es enero, donde se consumió un 25,8 % menos que lo indicado por el modelo.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-25	6,39	8,61	-25,8 %
feb-25	8,46	8,91	-5,0 %
mar-25	8,76	9,47	-7,5 %
abr-25	8,47	8,69	-2,5 %
may-25	8,50	9,00	-5,6 %
jun-25	7,82	8,24	-5,1 %

Tabla 5.26: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 3 año 2025.

5.3.7.c. Operación

La sección 3 de molienda convencional, compuesta por los molinos 8 y 9, registró en julio 11 y 10 arranques según la tabla 5.27. La figura 5.30 evidencia una operación más continua que en secciones anteriores, con 697 horas de funcionamiento (93 %). En agosto, la tabla 5.28 muestra una leve reducción en el tiempo encendido.

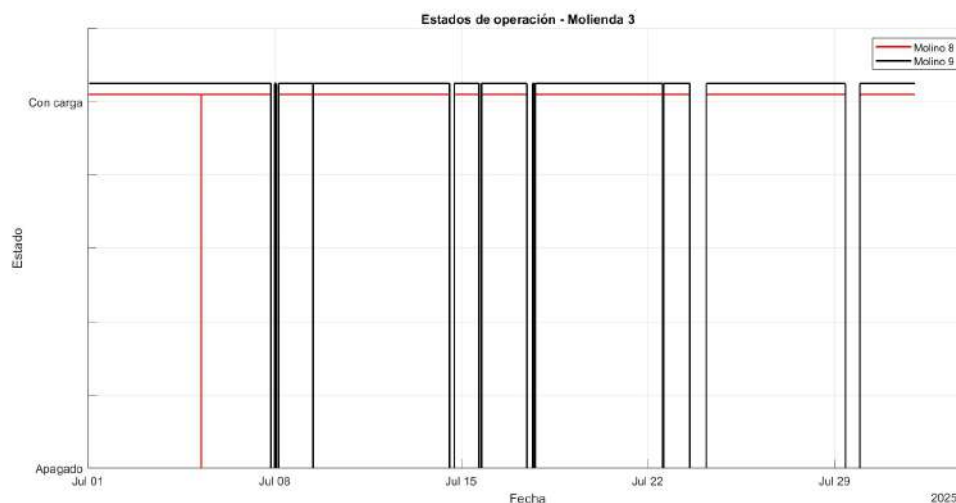


Figura 5.30: Estados de operación Sección 3 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 8	11	697,6	46,38	93,8 %
Molino 9	10	697,5	46,50	93,8 %

Tabla 5.27: Resumen operación Sección 3 Molienda Convencional en el mes de julio.

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 8	8	660,9	83,1	88,8 %
Molino 9	8	660,7	83,3	88,8 %

Tabla 5.28: Resumen operación Sección 3 Molienda Convencional en el mes de agosto.

La figura 5.31 corresponde a un gráfico del OT en el periodo de los años 2023, 2024 y

2025. Se observa que esta sección tiene un comportamiento similar durante los años con un punto de operación cercano al 90 %. Hay un a caída que llega al 40 % de operación en diciembre del 2023, se revisó el registro de mantenimiento y fallas donde no se observó algún incidente directo en la molienda 3.



Figura 5.31: Operación molienda 3 durante los años 2023, 2024 y 2025.

5.3.8. Desempeño energético Molienda 4

5.3.8.a. Año 2024

Tal como se ha comentado en las secciones anteriores, en julio del año 2024 ocurrió un evento en la sección 2 lo que alteró la operación de esa molienda. En el caso de la sección 4 en el mes de julio no quedó registro en el consumo eléctrico del mes y se acumuló al mes de agosto en un valor de 872.806 [kWh]. Para tener un análisis de estos meses se consideró utilizar el consumo eléctrico del modelo para el mes de julio y utilizar la diferencia entre este valor y el registrado para obtener el consumo del mes de agosto. La tabla 5.29 presenta los valores de los parámetros a utilizar.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-24	585.263	68,310	704,8	94,7 %
feb-24	563.696	63,858	672,5	96,6 %
mar-24	385.355	46,694	480,5	64,6 %
abr-24	529.219	62,338	655,2	90,9 %
may-24	585.712	67,215	704,1	94,6 %
jun-24	387.835	43,088	484,6	67,3 %
jul-24	485.878	56,377	586,8	78,9 %
ago-24	386.928	55,443	585,4	78,7 %
sept-24	529.966	64,915	699,9	97,3 %
oct-24	623.926	65,792	697,0	93,7 %
nov-24	599.565	63,918	655,1	91,0 %
dic-24	682.232	70,488	697,0	93,7 %

Tabla 5.29: Parámetros de eficiencia energética Molienda 4 2024.

La figura 5.32 presenta la tendencia de los indicadores de desempeño energético real y proyectado. Se observa que hasta el mes de julio no hay mayor diferencia entre estos valores. Sin embargo, el mes de agosto tiene una diferencia considerable por una disminución del IDE real. Esto puede estar asociado al dato faltante del mes de julio y la utilización del modelo.

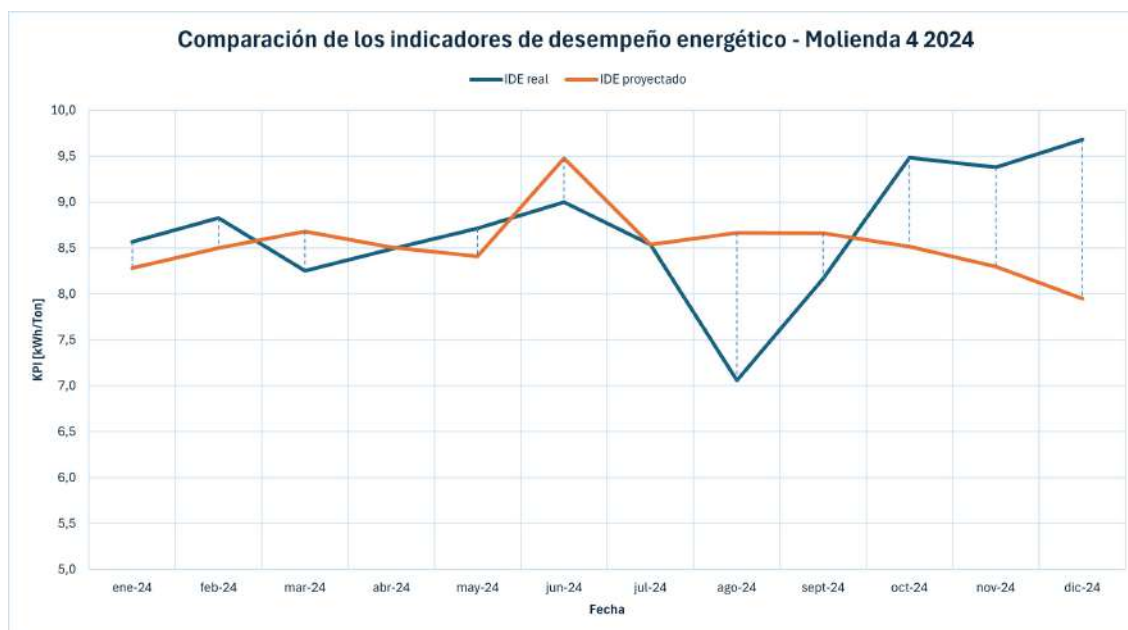


Figura 5.32: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 4 año 2024.

En los meses de octubre y noviembre se alcanza un consumo real que supera en un 11 % al proyectado según la tabla 5.30, mientras que en el mes de diciembre se llega a un valor de 18 %.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-24	8,6	8,3	3,6 %
feb-24	8,8	8,5	3,5 %
mar-24	8,3	8,7	-4,6 %
abr-24	8,5	8,5	0,0 %
may-24	8,7	8,4	3,6 %
jun-24	9,0	9,5	-5,3 %
jul-24	8,6	8,5	1,2 %
ago-24	7,0	8,7	-19,5 %
sept-24	8,2	8,7	-5,7 %
oct-24	9,5	8,5	11,8 %
nov-24	9,4	8,3	13,3 %
dic-24	9,7	7,9	22,8 %

Tabla 5.30: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 4 año 2024.

5.3.8.b. Año 2025

En el año 2025 se tiene los parámetros de la tabla 5.31 para analizar el desempeño energético de la sección 4.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	H_{op} [h]	OT
ene-25	457.621	60,184	633	85,0 %
feb-25	620.450	57,485	621	92,3 %
mar-25	434.228	48,554	550	74,0 %
abr-25	552.406	63,550	668	92,6 %
may-25	529.779	62,565	677	91,0 %
jun-25	527.306	64,280	673	93,5 %

Tabla 5.31: Parámetros de eficiencia energética Molienda 4 2025.

Según la figura 5.33 se tiene una tendencia similar entre ambos indicadores, excepto en los meses de enero y febrero donde se presentan diferencias.

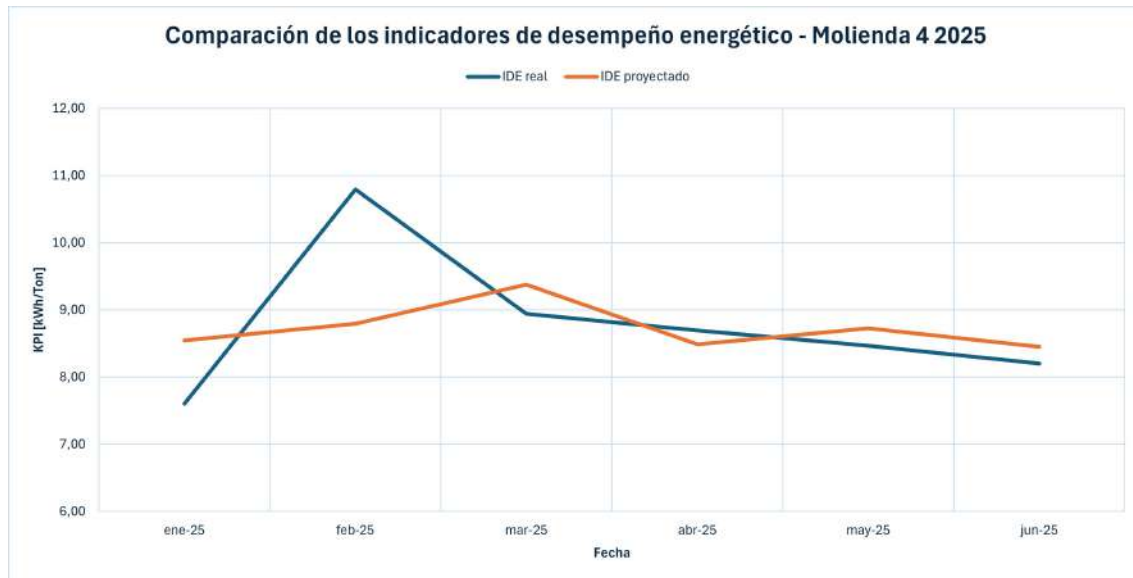


Figura 5.33: Comparación Indicador de desempeño energético real y proyectado Molienda 4 año 2025.

De la tabla 5.32 se observa que en el mes de enero el consumo es menor en un 11 % respecto al modelo, mientras que en febrero se alcanza un consumo 22,7 % superior al esperado. Este sobrepaso es considerable e indica que en ese mes existió una ineficiencia en la utilización de la energía.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-25	7,60	8,54	-11,0 %
feb-25	10,79	8,79	22,7 %
mar-25	8,94	9,38	-4,7 %
abr-25	8,69	8,49	2,4 %
may-25	8,47	8,72	-2,9 %
jun-25	8,20	8,45	-3,0 %

Tabla 5.32: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda 4 año 2025.

5.3.8.c. Operación

Al igual que en la sección 3, se observa en la figura 5.34 que existe un funcionamiento más constante y con menos detenciones. Esto se refleja en la tabla 5.33 donde se tiene una cantidad de 13 arranques tanto para el molino 10 como el molino 11. Se traduce en una operación del 94,7 % respecto a las horas programadas.

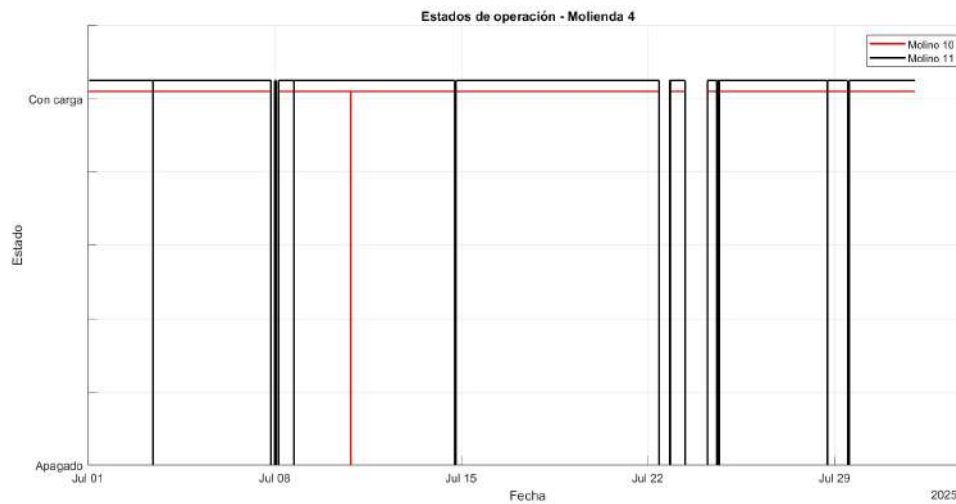


Figura 5.34: Estados de operación Sección 4 Molienda Convencional. Mes de Julio 2025

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 10	13	704,5	39,48	94,7 %
Molino 11	13	704,4	39,60	94,7 %

Tabla 5.33: Resumen operación Sección 4 Molienda Convencional mes de julio.

La tabla 5.34 presenta el resumen de operación de la sección 4 en el mes de agosto, se observa que existe una disminución en el tiempo encendido y un aumento en el número

de arranques.

Equipo	Nº Arranques	Tiempo encendido [h]	Tiempo apagado [h]	OT [%]
Molino 10	15	665,5	78,5	89,5 %
Molino 11	19	672,0	72,0	90,3 %

Tabla 5.34: Resumen operación Sección 4 Molienda Convencional mes de agosto.

En este caso se presenta el gráfico de la figura 5.35 y al igual que en los anteriores se observa que en el año 2023 la operación se mantenía constante y cercana al 95 %. En los años 2023 y 2025 se observa que existen variaciones en la operación con caídas que llegan alrededor del 70 %.



Figura 5.35: Operación molienda 4 durante los años 2023, 2024 y 2025.

Capítulo 6

Análisis de desempeño energético en Flotación

En este capítulo se analizará el desempeño energético del proceso de flotación, considerado un área de uso significativo de energía dentro de la planta concentradora. El objetivo es establecer una línea de base energética conforme a la Norma ISO 50001:2018 [1], que permita evaluar el comportamiento del proceso en condiciones normales de operación y servir como referencia para los análisis de años posteriores.

Se construirá un modelo matemático que relacione las principales variables de operación con el consumo eléctrico, de modo de calcular indicadores de desempeño energético (IDE) y comparar el consumo real con el proyectado por el modelo. Este contraste permitirá identificar desviaciones, cuantificar ineficiencias y proponer medidas de mejora en la gestión energética del área.

6.1. Sistema de estudio

El proceso de flotación representa un 16 % del consumo eléctrico total de El Soldado. Este se compone por celdas de flotación que representan el 33 % del consumo del proceso, bombas de relave final que llegan al 23 %, flotación de arenas que alcanza un 32 % y el molino de remolienda que representa un 11 %. A este proceso llega la pulpa mineral que contiene un porcentaje de cobre y el resto de la roca. Se pasa por un proceso químico para separar estos componentes y así llegar hasta el concentrado de cobre final. Hay sub-procesos que son parte de flotación tales como: Flotación Pre-Rougher, Rougher, Scavenger, Arenas y Remolienda.

6.1.1. Flotación Pre-Rougher

Esta sección es alimentada por la Molienda SAG, la Sección 1 de Convencional y el Molino 2000. El esquema de la figura 6.1 presenta la disposición de los equipos asociados, en ella operan dos celdas de flotación Wenco 3000, cada una con una potencia de 200 [HP], equipadas con partidor suave. Desde la flotación Pre-Rougher se alimenta la Rougher, la Columna 1 y Remolienda para continuar con el proceso.

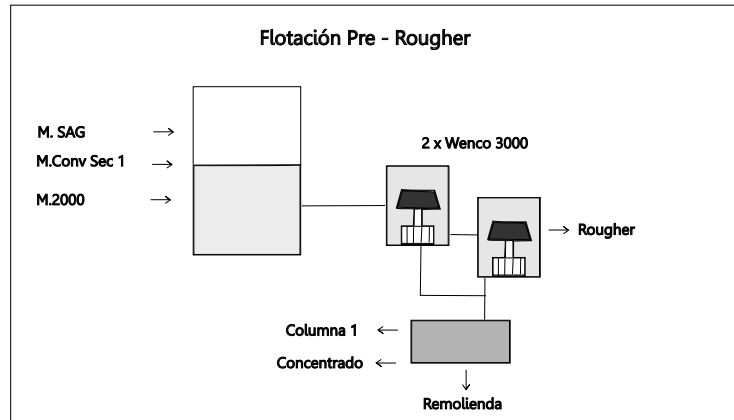


Figura 6.1: Esquema flotación Pre-Rougher.

6.1.2. Flotación Rougher

A este proceso lo alimenta la flotación Pre-Rougher, y se compone por las 3 filas de las celdas de flotación Wenco 1500 tal como se muestra en la figura 6.2. La fila A y B tienen 9 motores de 100 [HP] cada una, mientras que la fila C constituye de 10 motores de 100 [HP] y 2 de 75 [HP]. Desde esta sección se alimenta la Remolienda y se obtiene una parte del relave final.

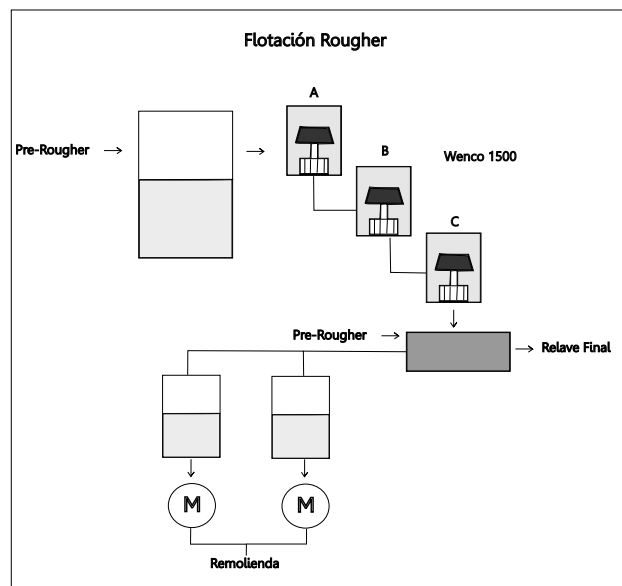


Figura 6.2: Esquema flotación Rougher.

6.1.3. Flotación Scavenger

El esquema de la figura 6.3 muestra que el material proveniente de las columnas 1 y 2 ingresa a esta etapa del proceso, donde atraviesa diez celdas de flotación Wenco 1000 y una celda adicional Wenco 4500. Luego, la pulpa es conducida hacia la sección de Remolienda, en la cual se realiza un repaso de molienda antes de finalizar la obtención del relave.

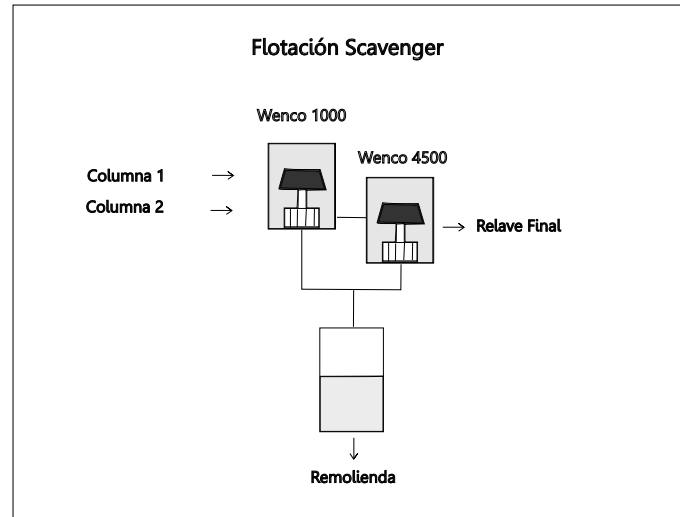


Figura 6.3: Esquema flotación Scavenger.

6.1.4. Flotación Arenas

Esta sección se presenta en el esquema 6.4 y recibe alimentación de mineral desde la planta CPF y el circuito Scavenger, y anteriormente incluía el paso por las celdas Rougher Lamas, actualmente fuera de operación. En ella se encuentra un molino de bolas con una potencia instalada de 550 [kW], encargado de la molienda adicional del mineral. Además, cuenta con cinco celdas de flotación Wenco 1500, cada una equipada con motores de 100 [HP]. El proceso continúa hacia las etapas de Remolienda, seguido por la segunda y tercera limpieza, donde se optimiza la recuperación del concentrado final.

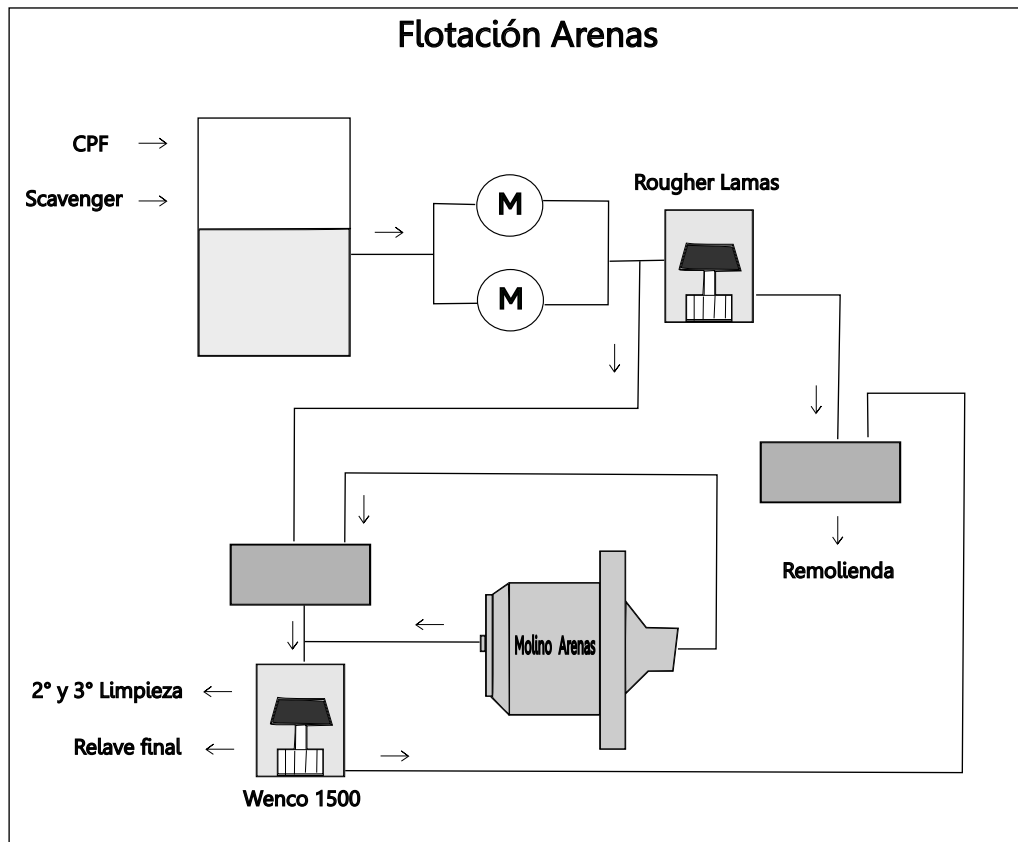


Figura 6.4: Esquema flotación Arenas.

6.1.5. Remolienda

La etapa de Remolienda que se muestra en el esquema de la figura 6.5 está compuesta por el molino 7 de bolas, el cual opera con una potencia instalada de 350 [kW]. Desde esta unidad, se genera la alimentación hacia las columnas 1 y 2, permitiendo la continuidad del proceso de concentración mineral aguas abajo.

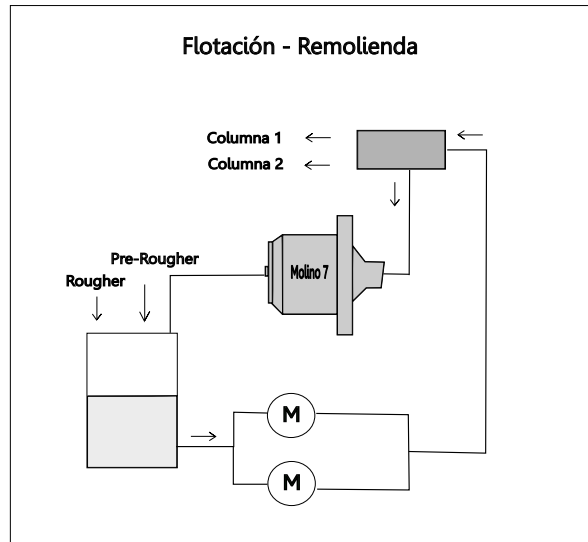


Figura 6.5: Esquema Remolienda.

6.1.6. Flotación: Columna 1, 2 y espesadores

Finalmente, las columnas 1 y 2 cumplen la función de alimentar con pulpa mineral a los procesos de flotación Scavenger y a los espesadores. Durante esta etapa, se lleva a cabo la separación principal del cobre sólido contenido en la pulpa, aislándolo del líquido. Posteriormente, es conducido al sistema de filtrado, donde se obtiene el concentrado final de cobre. Este sistema se resume en el esquema de la figura 6.6.

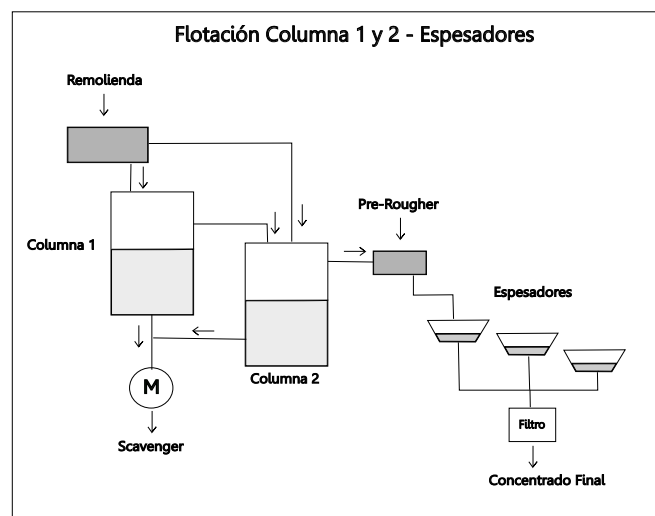


Figura 6.6: Esquema Columna 1, 2 y espesadores.

6.2. Análisis de eficiencia energética

6.2.1. Criterios de definición de la línea de base energética

La línea base toma en cuenta un periodo de tiempo adecuado que logre generar una base de información sobre el uso de energía y las variables relevantes que representan el periodo. Para esto se establece una metodología [17]:

1. El periodo debe incluir ciclos de operación normales, en los cuales no debe haber cambios tecnológicos, operativos o energéticos significativos.
2. El periodo definido debe contener pocos eventos irregulares tales como: catástrofes naturales, alteraciones operativas, mantenciones extraordinarias.
3. Retroceder a lo más un máximo de cinco años en la recopilación de información, para así no tener un escenario de operación tan diferente. Es importante que en este periodo de análisis se cuente con toda la información correspondiente.

Adicionalmente, se considera que en caso de ocurrir eventos irregulares de forma frecuente, estos deben ser incluidos en la línea base ya que pasan a ser parte de la operación normal.

6.2.2. Criterios de elección variables relevantes

En la recopilación de información para el análisis de las secciones de molienda convencional, se lograron recopilar las siguientes variables: Material procesado [Ton], Toneladas de concentrado, Toneladas de relave, Ley de concentrado.

La idea es obtener un modelo matemático lineal que relaciona una o más variables relevantes con el consumo eléctrico. El modelo esperado tiene la siguiente forma para “n” variables independientes:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad (6.1)$$

Para la elección de estas variables representativas se deben establecer ciertos criterios los cuales se utilizaron en la revisión energética del SGE [4]. A continuación se enumera cada uno de ellos:

1. Información completa de las variables en el periodo anual.
2. $R^2 \geq 0,75$
3. Valor de P (P_{value}) $\leq 0,05$

6.2.3. Elección del año de línea base energética

Al igual que en el análisis de molienda convencional, se estableció un horizonte de 5 años hacia atrás para evaluar los criterios planteados. Se tienen las siguientes consideraciones:

- El año 2020 considera la pandemia por el Coronavirus que afectó a nivel global la vida de las personas. Este periodo no cumple con el criterio 2 dado la alteración operativa.
- En el año 2024 ocurrió un evento de gran relevancia en el área de Molienda Convencional. Lo que condiciona la operación aguas abajo.

Para el análisis de eficiencia energética se estudia el año 2023 como línea de base energética, dado que se tiene la información de los consumos, producción por sección para ese año y es el más cercano a la actualidad. La tabla 6.1 presenta un resumen del cumplimiento de los criterios definidos:

Año	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
2024	No	No	Si
2023	Si	Si	Si
2022	Si	Si	Si
2021	Si	Si	Si
2020	No	No	Si

Tabla 6.1: Cumplimiento criterios año base.

6.2.4. Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2023

En la tabla 6.2 se recopilan las variables que pueden influir en el consumo eléctrico del proceso de flotación. Estos valores se obtienen desde data técnica y se tienen variables como el material que ingresa al proceso, los productos concentrado de cobre y relaves, y la ley de concentrado.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [Ton]	Relave [Ton]	Concentrado [Ton]	Ley
ene-23	2.824.942	637.744	623.051	14.693	0,2773
feb-23	1.358.760	260.926	255.809	5.117	0,2709
mar-23	2.475.249	566.346	552.021	14.325	0,2335
abr-23	2.528.351	501.765	487.058	14.707	0,2661
may-23	2.861.797	654.446	633.341	21.105	0,2449
jun-23	2.840.169	625.187	605.470	19.718	0,2330
jul-23	3.257.818	710.500	690.304	20.196	0,2498
ago-23	3.141.188	655.564	645.599	9.965	0,2453
sept-23	3.281.166	660.700	651.769	8.931	0,2530
oct-23	3.342.780	690.791	680.420	10.370	0,2388
nov-23	2.729.175	589.844	577.619	12.225	0,2337
dic-23	1.402.573	245.676	236.875	8.801	0,2205

Tabla 6.2: Información recopilada variables relevantes Flotación 2023.

Se realiza un análisis de regresión lineal para conocer el nivel de relación que tienen las variables relevantes propuestas con el consumo eléctrico real.

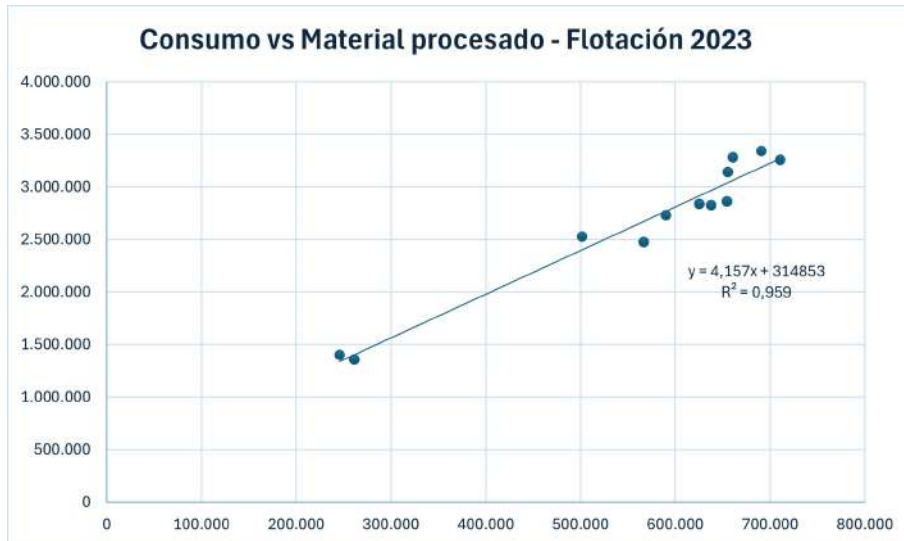


Figura 6.7: Gráfico consumos versus Material procesado año 2023 - Flotación.

La figura 6.7 presenta un gráfico de dispersión del consumo eléctrico como variable dependiente y el mineral procesado por el proceso de flotación. Se observa que hay relación lineal considerable, dado que se tiene un coeficiente R^2 igual a 0,959.

Esto se replica para la variable de toneladas de relaves, donde se obtiene un coeficiente R^2 igual a 0,9649 que es mayor al caso anterior, tal como se muestra en la figura 6.8.

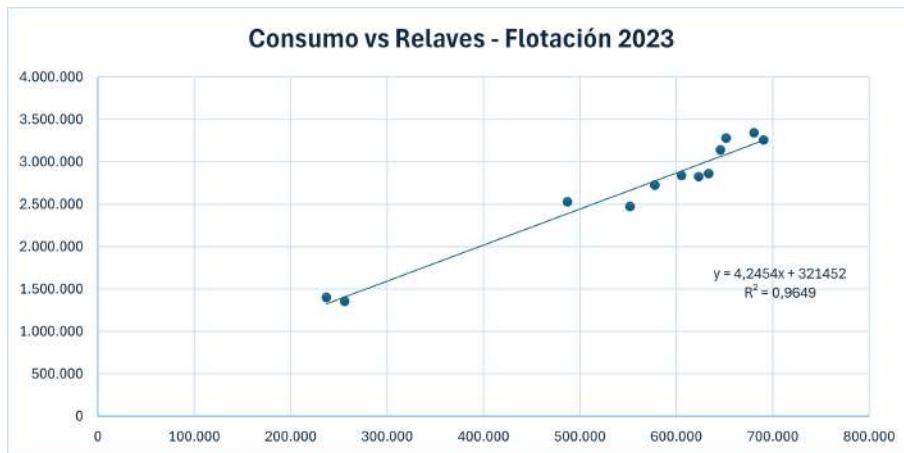


Figura 6.8: Gráfico consumos versus toneladas de relaves año 2023 - Flotación.

Por otro lado, en la figura 6.9 se evalúa la variable de toneladas de concentrado, donde se observa que no hay una relación lineal con el consumo eléctrico dado que su coeficiente de relación lineal es igual a 0,2012.

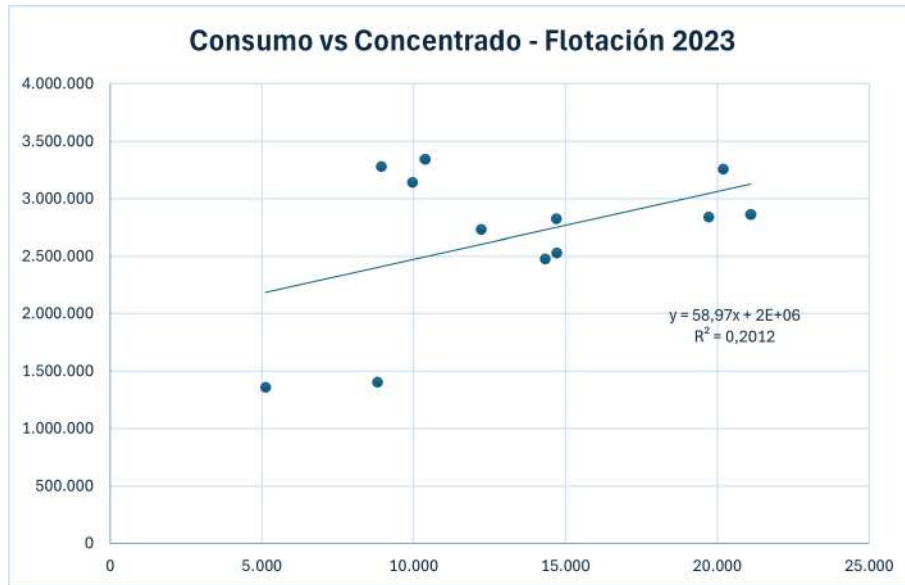


Figura 6.9: Gráfico consumos versus Toneladas de concentrado año 2023 - Flotación.

Se evalúa la variable de ley de concentrado respecto al consumo eléctrico, obteniendo un coeficiente R^2 igual a 0,0003. En la figura 6.10 se observa que no existe una relación lineal entre ambos.



Figura 6.10: Gráfico consumos vs Ley de concentrado año 2023 - Flotación.

Finalmente se realiza una tabla resumen donde se comparan los resultados obtenidos de la regresión lineal con variables relevantes. Se incluye una relación multivariable que considera distintas combinaciones entre las variables relevantes.

VARIABLES RELEVANTES	R^2	CUMPLE
Material Procesado	0,959	Si
Toneladas de relave	0,9649	Si
Toneladas de concentrado	0,2012	No
Ley de concentrado	0,0003	No
Material y relaves	0,9743	Si
Concentrado y relaves	0,9743	Si
Material y concentrado	0,9817	Si

Tabla 6.3: Verificación cumplimiento variables relevantes flotación.

La idea es trabajar con un modelo multivariable que relacione al menos dos variables relevantes para obtener el consumo eléctrico. De la tabla 6.3 se observa que el coeficiente R^2 mayor se alcanza cuando se combinan variables. Por lo tanto se analiza el criterio del valor de P considerando la regresión lineal múltiple, obteniendo la tabla 6.4.

Modelo	Material		Relaves		Concentrado		Cumple
	β_1	P-value	β_2	P-value	β_3	P-value	
Material y relaves	-15198,8	0,102	19714,0	0,045	-	-	No
Concentrado y relaves	-	-	4,52	5E-08	-15,20	0,102	No
Material y concentrado	4,61	7,9E-08	-	-	-22,41	0,019	Si

Tabla 6.4: Verificación cumplimiento modelo flotación.

Así, el modelo matemático que representa el consumo eléctrico del proceso de flotación queda representado por:

$$Consumo[kWh] = 4,61 \cdot Ton_{material} - 22,41 \cdot Ton_{concentrado} + 338358 \quad (6.2)$$

La tabla 6.5 presenta los valores de los consumos eléctricos obtenidos utilizando el modelo matemático.

Fecha	Consumo real [kWh]	Consumo proyectado [kWh]	Variación
ene-23	2.824.942	2.951.174	4,5 %
feb-23	1.358.760	1.427.420	5,1 %
mar-23	2.475.249	2.630.045	6,3 %
abr-23	2.528.351	2.323.534	-8,1 %
may-23	2.861.797	2.884.504	0,8 %
jun-23	2.840.169	2.780.623	-2,1 %
jul-23	3.257.818	3.163.471	-2,9 %
ago-23	3.141.188	3.139.363	-0,1 %
sept-23	3.281.166	3.186.232	-2,9 %
oct-23	3.342.780	3.292.795	-1,5 %
nov-23	2.729.175	2.785.518	2,1 %
dic-23	1.402.573	1.274.473	-9,1 %

Tabla 6.5: Comparación de los Consumos real y proyectado en el proceso de Flotación año 2023.

Se realiza un gráfico para comparar el consumo real y el obtenido utilizando el modelo anterior. Se observa en la figura 6.11 que el modelo tiene un buen seguimiento respecto al valor real.

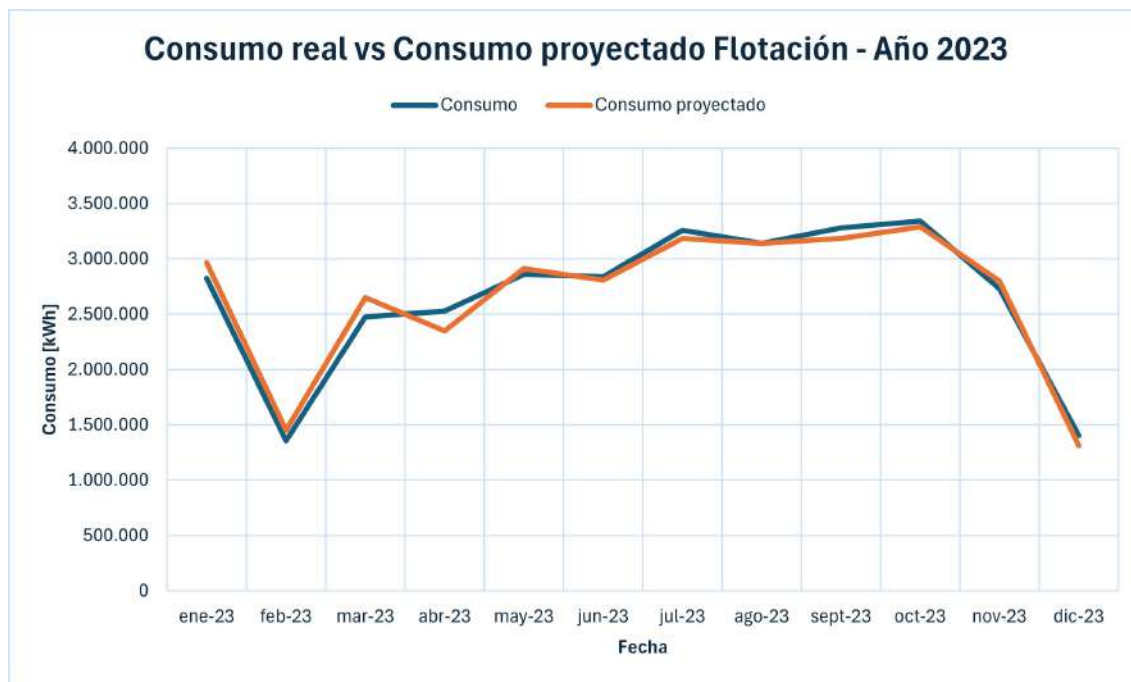


Figura 6.11: Comparación del consumo eléctrico real y el consumo eléctrico del modelo matemático en el año 2023

6.3. Desempeño energético

6.3.1. Año 2024

Se realiza una revisión del proceso de flotación en el año 2024, donde se calcula el indicador de desempeño energético del proceso como el factor entre consumo eléctrico [kWh] y material procesado [Ton]. Para tener una referencia comparativa se utiliza el modelo matemático de la ecuación (6.2) que entrega el consumo eléctrico mensual y con este valor se calcula un indicador de desempeño energético proyectado. La figura 6.12 presenta la comparación gráfica entre ambos indicadores. Se observa que, durante todos los meses del año 2024 —con excepción de noviembre— el IDE_{real} supera al $IDE_{proyectado}$. Este comportamiento sugiere que, para procesar la misma cantidad de material, el consumo energético efectivo resulta mayor al estimado por el modelo.

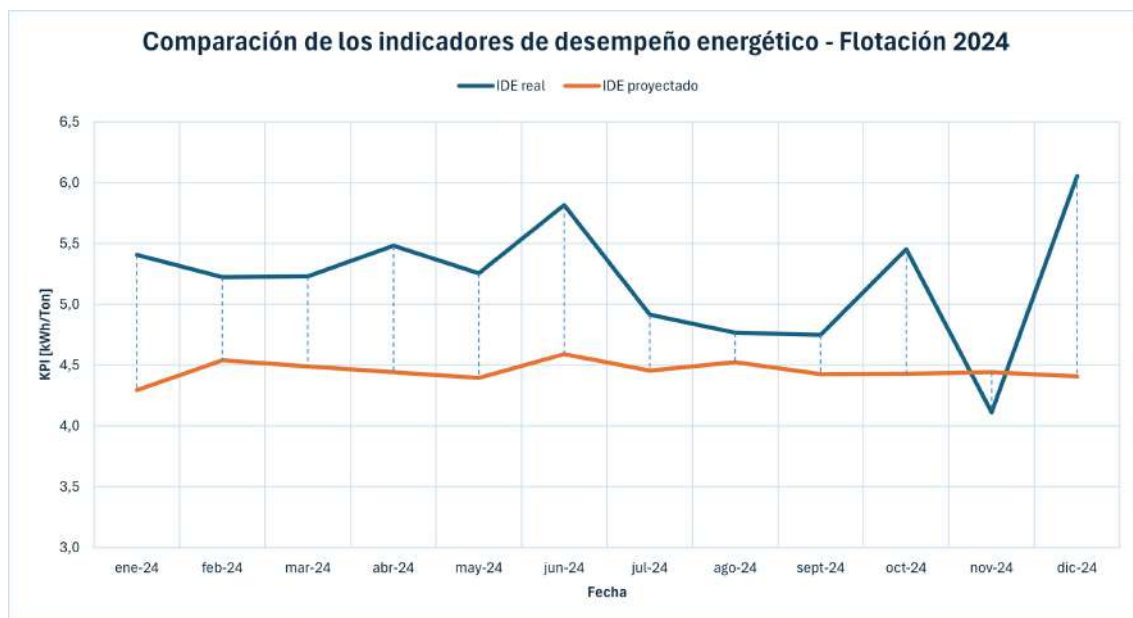


Figura 6.12: Comparación de los Indicadores de desempeño energético en Flotación año 2024.

La Tabla 6.6 muestra que, en la mayoría de los meses de 2024, el IDE_{real} supera al $IDE_{proyectado}$ con diferencias que alcanzan entre un 10 % y un 38 %. La única excepción es noviembre, donde el indicador real resulta 7,7 % menor al modelo.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-24	5,4	4,29	25,9 %
feb-24	5,2	4,54	14,6 %
mar-24	5,2	4,49	15,8 %
abr-24	5,5	4,44	23,9 %
may-24	5,3	4,40	20,5 %
jun-24	5,8	4,59	26,4 %
jul-24	4,9	4,45	10,1 %
ago-24	4,8	4,52	6,2 %
sept-24	4,7	4,43	6,1 %
oct-24	5,5	4,43	24,2 %
nov-24	4,1	4,44	-7,7 %
dic-24	6,1	4,41	38,3 %

Tabla 6.6: Comparación de los IDE real y proyectado en Flotación año 2024.

6.3.2. Año 2025

Al igual que en el año 2024, se emplea el modelo matemático generado a partir del año de referencia para comparar el IDE_{real} . En la figura 6.13 se observa que, a partir de febrero, el IDE_{real} supera al $IDE_{proyectado}$, alcanzando en dicho mes una variación de 53,8 %. Esto evidencia que, para procesar la misma cantidad de material, se consumió más energía de la esperada según lo estimado por el modelo.

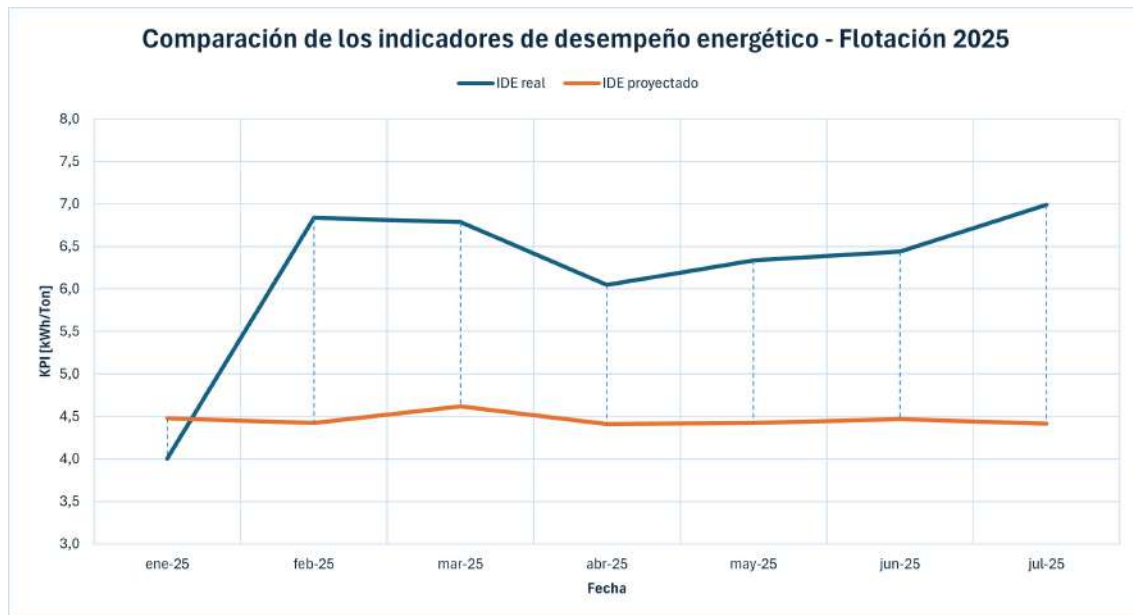


Figura 6.13: Comparación de los Indicadores de desempeño energético en Flotación año 2025.

Fecha	IDE_{real} [kWh/ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/ton]	Variación
ene-25	4,0	4,48	-10,7 %
feb-25	6,8	4,42	53,9 %
mar-25	6,8	4,62	47,2 %
abr-25	6,0	4,41	36,1 %
may-25	6,3	4,42	42,5 %
jun-25	6,4	4,47	43,2 %

Tabla 6.7: Comparación de los IDE real y proyectado en Flotación año 2025.

La tabla 6.7 presenta los valores de los indicadores de desempeño real y proyectado para el año 2025. Se observa que el sobrepaso del consumo real es desde un 36,1 % a un 53,9% respecto al consumo proyectado. Debido a la alza del consumo eléctrico se genera una oportunidad de mejora en eficiencia energética donde se debe realizar un análisis causa raíz que explique esta situación.

Capítulo 7

Análisis de desempeño energético en Molienda SAG

En este capítulo se examinará el desempeño energético del proceso de molienda SAG, reconocido como uno de los principales consumidores de energía dentro de la planta concentradora. El propósito es establecer una línea de base energética conforme a la Norma ISO 50001:2018 [1], que permita caracterizar el comportamiento del sistema en condiciones normales de operación y disponer de un punto de referencia para evaluaciones futuras.

El análisis se desarrollará a partir de la caracterización de consumos eléctricos y de la construcción de indicadores de desempeño energético (IDE), los cuales se obtendrán relacionando la energía utilizada con las variables de producción y operación del molino. Más que un modelo predictivo, se busca generar un marco comparativo que permita contrastar el consumo real con valores de referencia, identificando desviaciones y cuantificando el impacto de las ineficiencias en la gestión energética.

De manera complementaria, se estudiarán los estados de operación de los motores del molino SAG —con carga, en vacío y apagado— utilizando los registros de los medidores en línea. El estado denominado “vacío” corresponde al vacío eléctrico, cuando el motor se encuentra desenganchado, y será analizado como una condición particular que influye en la eficiencia global del proceso. La revisión de estos estados permitirá definir patrones de operación, establecer un umbral crítico para la operación en vacío y proponer estrategias que equilibren eficiencia energética, disponibilidad operativa y costos asociados.

7.1. Sistema de estudio

En la operación se dispone de un único molino SAG, el cual funciona con dos motores sincrónicos de 6250 HP cada uno tal como se muestra en la figura 3.4. Este proceso concentra aproximadamente el 40 % del consumo eléctrico total de la planta. La alimentación se realiza a través de la correa 3003, que transporta material proveniente del chancado primario. Como resultado, se obtiene un producto de mayor fineza que continúa en la etapa de molienda, mientras que la pulpa mineral es conducida hacia el proceso de flotación mediante bombas de hidrociclones.

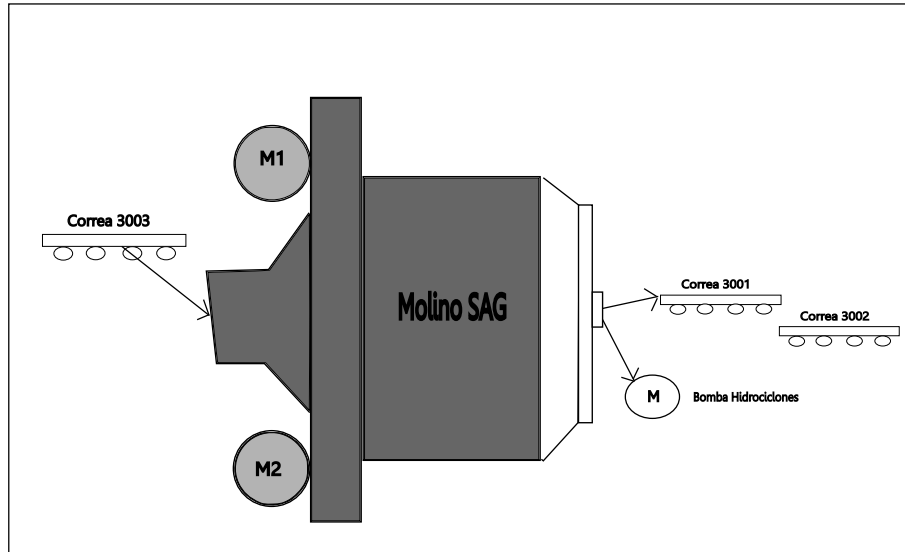


Figura 7.1: Esquema simplificado Molienda SAG.

7.2. Análisis de eficiencia energética

7.2.1. Criterios de definición de la línea de base energética

Se busca tener un periodo de tiempo adecuado que logre generar una base de información sobre el uso de energía y las variables relevantes que representen el consumo. Para esto se establece una metodología [17]:

1. El periodo debe incluir ciclos de operación normales, en los cuales no debe haber cambios tecnológicos, operativos o energéticos significativos.
2. El periodo definido debe contener pocos eventos irregulares tales como: catástrofes naturales, alteraciones operativas, mantenciones extraordinarias.
3. Retroceder a lo más un máximo de cinco años en la recopilación de información, para así no tener un escenario de operación tan diferente. Es importante que en este periodo de análisis se cuente con toda la información correspondiente.

Adicionalmente, se considera que en caso de ocurrir eventos irregulares de forma frecuente, estos deben ser incluidos en la línea base ya que pasan a ser parte de la operación normal.

7.2.2. Criterios de elección variables relevantes

Se lograron recopilar las siguientes variables: Material procesado [Ton] y horas de operación.

La idea es obtener un modelo matemático lineal que relaciona una o más variables relevantes con el consumo eléctrico. El modelo esperado tiene la siguiente forma para “n” variables independientes:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad (7.1)$$

Para la elección de estas variables representativas se deben establecer ciertos criterios los cuales se utilizaron en la revisión energética del SGE [4]. A continuación se enumera cada uno de ellos:

1. Información completa de las variables en el periodo anual.
2. $R^2 \geq 0,75$
3. Valor de P (P_{value}) $\leq 0,05$

7.2.3. Elección del año de línea base energética

Al igual que en el análisis de molienda convencional y flotación, se estableció un horizonte de cinco años hacia atrás para evaluar los criterios planteados. Se tienen las siguientes consideraciones:

- El año 2020 considera la pandemia por el Coronavirus que afectó a nivel global la vida de las personas. Este periodo no cumple con el criterio 2 dado la alteración operativa.
- En el año 2023 se efectuó una mantención programada durante todo el mes de febrero en el Molino SAG, la cual incluyó el reemplazo de la corona. Posteriormente, se presentó una falla en la excitatriz de uno de los motores, lo que mantuvo al equipo fuera de operación otro periodo más. .
- En el año 2024 ocurrió un evento de gran relevancia en el área de Molienda Convencional. Lo que condiciona la operación aguas abajo.

La figura 7.2 muestra la tendencia del consumo y material procesado por la Molienda SAG en el horizonte de tiempo estudiado. Se observa que en el año 2023 hay dos meses en los que se nota una clara alteración operativa.

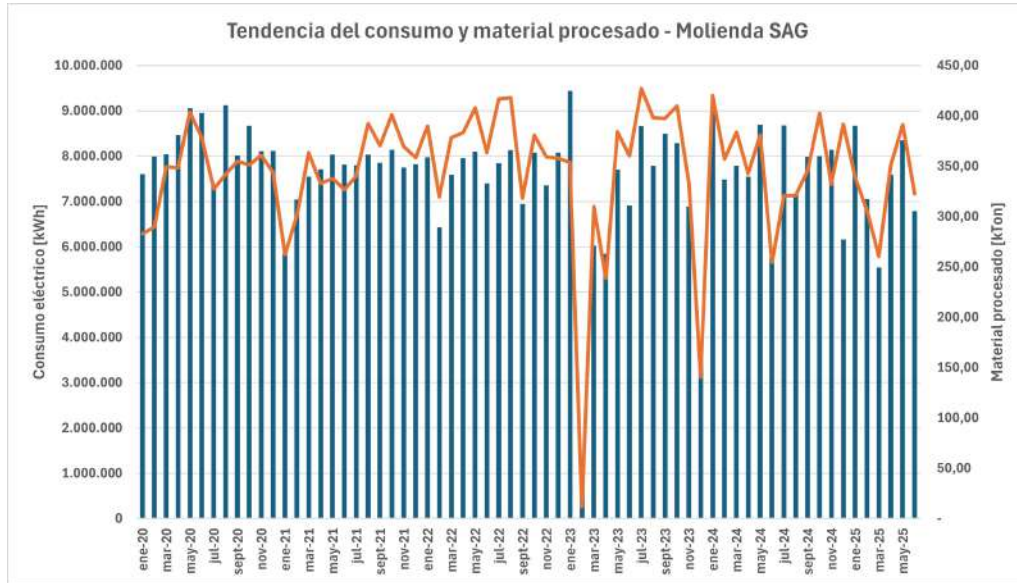


Figura 7.2: Tendencia del consumo eléctrico y material procesado durante los años 2020 al 2025.

Para el análisis de eficiencia energética se estudia el año 2022 como línea de base energética, dado que se tiene la información de los consumos, producción mensual para ese año y se encuentra dentro del horizonte de tiempo permitido.

Año	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
2024	No	Si	Si
2023	No	No	Si
2022	Si	Si	Si
2021	Si	Si	Si
2020	No	No	Si

Tabla 7.1: Cumplimiento criterios año base.

La tabla 7.1 presenta un resumen del cumplimiento de los criterios para definir el año base. Se estudiará el año 2022, dado que es el más cercano que cumple todos los criterios.

7.2.4. Revisión del cumplimiento de las variables relevantes en el año 2022

Al igual que en los procesos de Flotación y Molienda Convencional se realiza un estudio de las variables relevantes involucradas en el proceso, de las cuales puedan explicar linealmente el consumo eléctrico. En la tabla 7.2 se presentan las variables de: Material procesado, Horas de operación y Toneladas por hora.

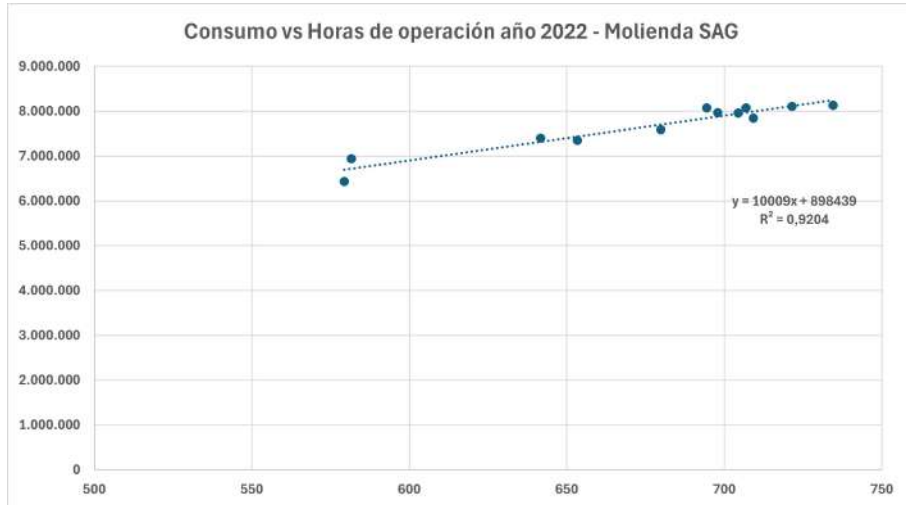


Figura 7.4: Gráfico de dispersión entre consumo eléctrico y horas de operación Molienda SAG año 2022.

Finalmente se evalúan las toneladas por horas mensuales de Molienda SAG, donde se observa en la figura 7.5 que no existe una relación lineal entre ésta variable y el consumo eléctrico.

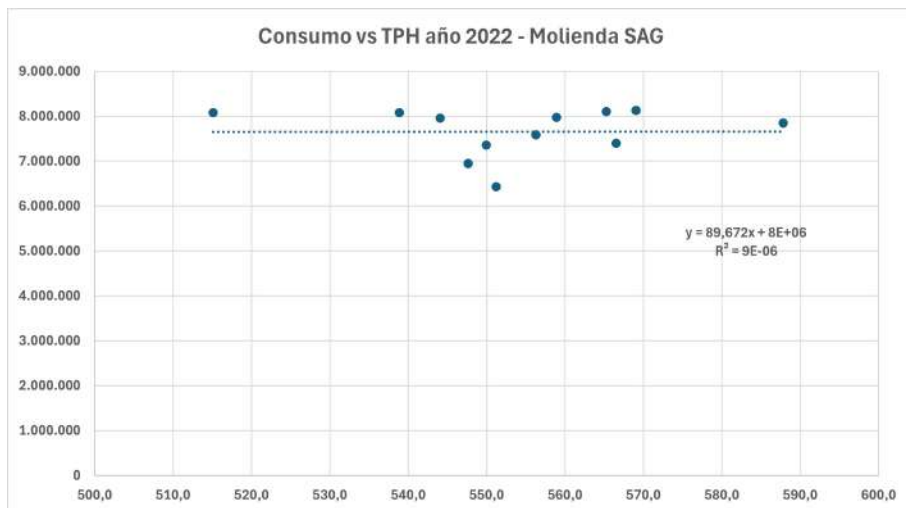


Figura 7.5: Gráfico de dispersión entre consumo eléctrico y toneladas por hora Molienda SAG año 2022.

Se resume lo anterior en la tabla 7.3, donde se incluye la combinación entre material procesado y las horas de operación.

VARIABLES RELEVANTES	R^2	CUMPLE
Material Procesado	0,5781	No
Horas de operación	0,9103	Si
Toneladas por hora	$9 \cdot 10^{-6}$	No
Material procesado y horas de operación	0,9559	Si

Tabla 7.3: Verificación cumplimiento variables relevantes Molienda SAG.

Se utilizará el modelo multivariable que relaciona el material procesado y las horas de operación con el consumo eléctrico mensual. Este modelo tiene un coeficiente R^2 igual a 0,9559 y un p-value de 0,0205 para las horas de operación y de $3 \cdot 10^{-5}$ para el material procesado.

$$\text{Consumo}[kWh] = 12444,7 \cdot H_{op} - 6413,9 \cdot kTon + 1,689,731 \quad (7.2)$$

7.2.5. Desempeño energético

7.2.5.a. Año 2024

Este año tuvo una alteración operativa a finales del mes de julio, donde ocurrió un incendio en la sección 2 de molienda convencional. Sin embargo, esto no influyó en gran medida a la operación del Molino SAG. Los parámetros a utilizar para este análisis se presentan en la tabla 7.4. Hay que tener en cuenta que el consumo real utilizado es el de la Molienda SAG completa, esto incluye tanto los motores de 6250 HP como los consumos de equipos auxiliares.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	Horas operación [h]	OT
ene-24	9.063.339	420,32	731	100,2 %
feb-24	7.486.030	356,96	603	91,8 %
mar-24	7.787.873	383,77	679	96,2 %
abr-24	7.550.318	342,57	607	118,1 %
may-24	8.696.999	380,91	698	95,8 %
jun-24	5.762.388	254,34	468	69,2 %
jul-24	8.682.674	320,53	581	79,7 %
ago-24	7.167.560	320,87	597	83,2 %
sept-24	7.985.094	345,98	605	92,2 %
oct-24	7.998.461	402,56	714	108,6 %
nov-24	8.145.403	331,62	616	87,4 %
dic-24	6.160.092	391,62	719	100,2 %

Tabla 7.4: Parámetros de eficiencia energética Molienda SAG año 2024.

Se realiza un gráfico comparativo entre los indicadores de desempeño energético real y del modelo matemático. Se observa en la figura 7.6 que en general el IDE real se encuentra sobre el IDE proyectado lo que se traduce como un mayor gasto energético de lo esperado para la cantidad de material procesado y las horas de operación mensuales.

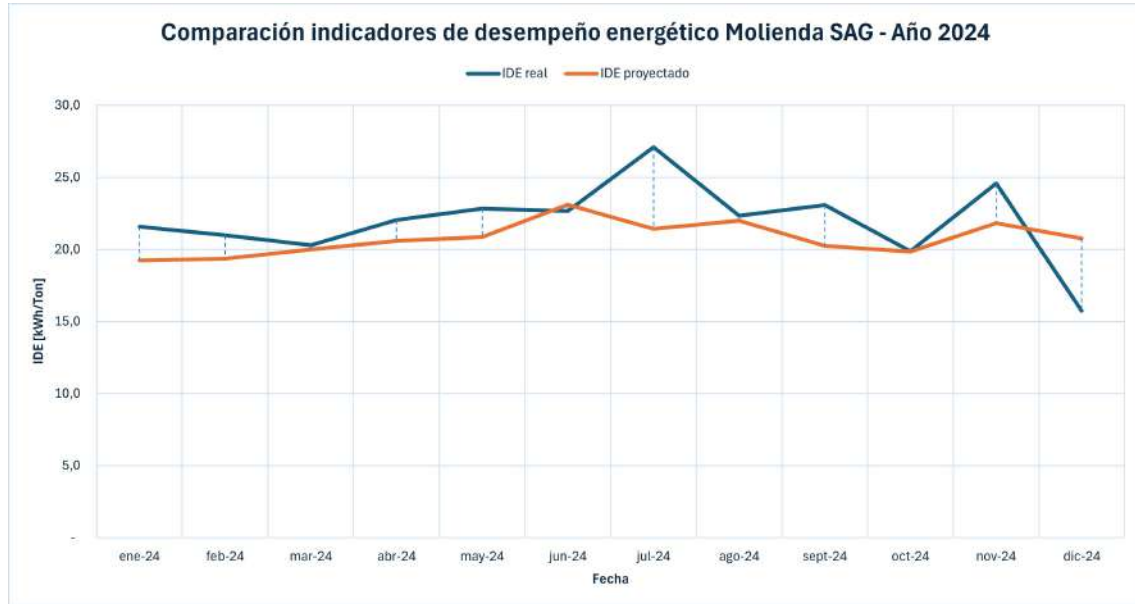


Figura 7.6: Comparación de los indicadores de desempeño energético en Molienda SAG año 2024.

La tabla 7.5 presenta los valores de las variaciones entre estos indicadores. En Julio se alcanza la mayor variación sobre el indicador proyectado llegando a un valor de 26,6%, mientras que en el mes de diciembre se llega a un punto de 24,2% bajo el IDE proyectado.

Fecha	IDE_{real} [kWh/Ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/Ton]	Variación
ene-24	21,6	19,2	12,5 %
feb-24	21,0	19,4	8,2 %
mar-24	20,3	20,0	1,5 %
abr-24	22,0	20,6	6,8 %
may-24	22,8	20,8	9,6 %
jun-24	22,7	23,1	-1,7 %
jul-24	27,1	21,4	26,6 %
ago-24	22,3	22,0	1,4 %
sept-24	23,1	20,2	14,4 %
oct-24	19,9	19,8	0,5 %
nov-24	24,6	21,8	12,8 %
dic-24	15,7	20,7	-24,2 %

Tabla 7.5: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda SAG año 2024.

Con los resultados obtenidos se interpreta que el proceso de Molienda SAG presentó una menor eficiencia energética durante el año 2024, especialmente en los meses de enero, julio, septiembre y noviembre, donde los consumos eléctricos fueron significativamente superiores a lo esperado.

7.2.5.b. Año 2025

Durante el año 2025 se tienen los parámetros de la tabla 7.6, donde se observa que el mes de enero tiene un consumo elevado considerando el material procesado y el OT.

Fecha	Consumo [kWh]	Material [kTon]	Horas operación [h]	OT
ene-25	8.671.917	338,71	619	86,0 %
feb-25	7.049.958	305,22	595	91,6 %
mar-25	5.540.441	260,42	514	83,1 %
abr-25	7.586.768	351,31	679	102,4 %
may-25	8.353.913	391,41	724	100,5 %
jun-25	6.786.958	322,71	605	96,5 %

Tabla 7.6: Parámetros de eficiencia energética Molienda SAG año 2025.

Tal como se comentó, el mes de enero registraba un consumo elevado para la operación que tuvo. Esto se refleja en el indicador de desempeño energético de la figura 7.7 donde se observa que su valor supera al IDE proyectado, lo que se traduce en un mayor consumo que el esperado para ese mes. El resto de meses tiene un comportamiento similar al IDE proyectado e incluso por debajo.

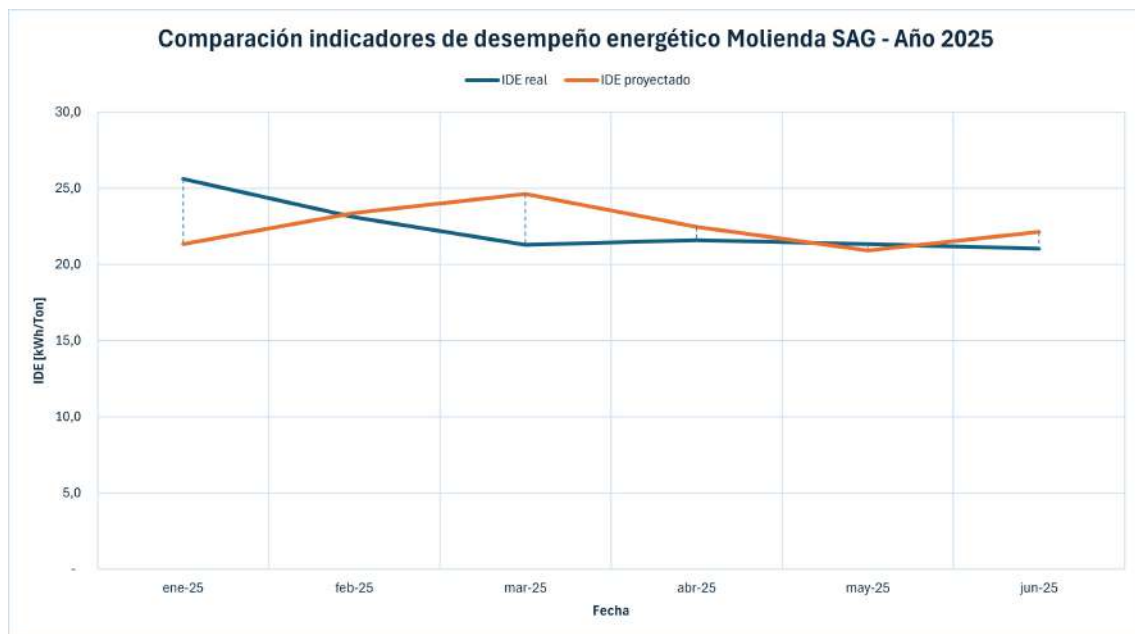


Figura 7.7: Comparación de los indicadores de desempeño energético en Molienda SAG año 2025.

La Tabla 7.7 presenta los valores de las variaciones porcentuales respecto al $IDE_{proyectado}$. En enero se registró un 20,2% por sobre el valor proyectado, mientras que en marzo se observó un 13,4% por debajo. Este comportamiento permite interpretar una ineficiencia energética en el mes de enero, asociada al mayor consumo eléctrico respecto de lo estimado por el modelo.

Fecha	IDE_{real} [kWh/Ton]	$IDE_{proyectado}$ [kWh/Ton]	Variación
ene-25	25,6	21,3	20,2 %
feb-25	23,1	23,4	-1,3 %
mar-25	21,3	24,6	-13,4 %
abr-25	21,6	22,5	-4,0 %
may-25	21,3	20,9	1,9 %
jun-25	21,0	22,1	-5,0 %

Tabla 7.7: Comparación de los IDE real y proyectado en Molienda SAG año 2025.

7.2.5.c. Operación

En esta sección se analiza la operación de los motores del Molino SAG durante el mes de julio de 2025, a partir de los datos obtenidos desde el medidor en línea Sfere 720 ubicado en el CCM 200. Se establecen rangos de valores para la demanda activa que permiten definir tres estados de operación: con carga, en vacío y apagado. Cabe precisar que el estado denominado “vacío” corresponde al vacío eléctrico, es decir, cuando el motor se encuentra desenganchado, y no implica que el molino opere sin material. En la figura 7.8 se observa la distribución de estos estados de operación durante el mes de julio.

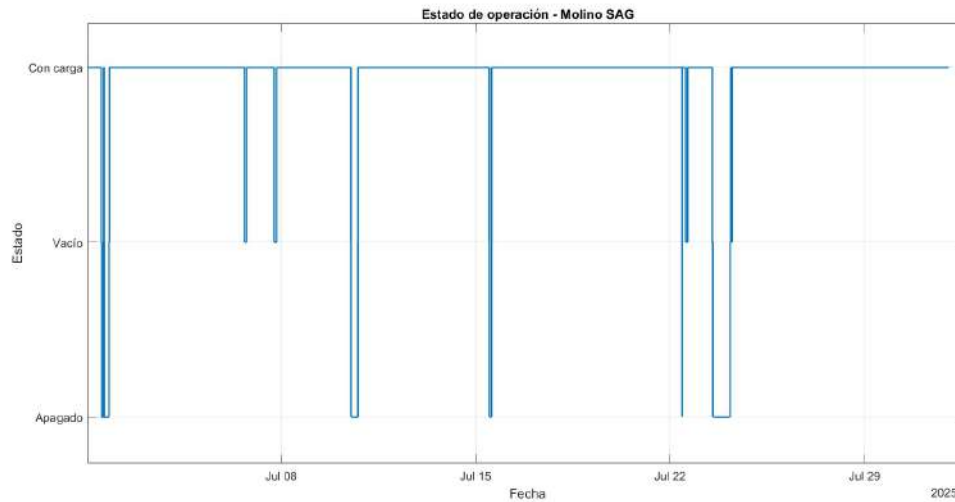


Figura 7.8: Estados de operación de los motores del molino SAG en Julio de 2025.

La tabla 7.8 presenta la cantidad de horas en cada estado. Se tiene que el 95 % del tiempo los motores se encuentran operando con carga, mientras que un 4 % está apagado. El 1 % restante representa la operación en vacío, esta condición se da debido a que el molino SAG cuenta con embragues para enganchar los motores.

Operación	Horas [h]
Apagado	28,72
En vacío	7,85
Con carga	707,42

Tabla 7.8: Operación de los motores Molino SAG en julio 2025.

A continuación se presentan los eventos de operación en vacío con su respectiva duración, el estado previo y posterior. Se observa que hay tres eventos considerables: dos eventos de 96 minutos y uno de 121 minutos. En estos casos el evento posterior fue la conexión del molino.

Evento	Fecha	Duración [min]	Previo	Posterior
1	01-jul-25	14	Con carga	Apagado
2	01-jul-25	7	Apagado	Con carga
3	01-jul-25	2	Con carga	Apagado
4	01-jul-25	21	Apagado	Con carga
5	06-jul-25	96	Con carga	Con carga
6	07-jul-25	121	Con carga	Con carga
7	10-jul-25	5	Con carga	Apagado
8	10-jul-25	7	Apagado	Con carga
9	15-jul-25	11	Con carga	Apagado
10	15-jul-25	4	Apagado	Con carga
11	22-jul-25	96	Con carga	Con carga
12	23-jul-25	18	Con carga	Apagado
13	24-jul-25	27	Apagado	Con carga
14	24-jul-25	28	Con carga	Con carga

Tabla 7.9: Operación en vacío motores Molino SAG en julio 2025.

De la tabla 7.9 se observa que hay eventos en los cuales existe una operación en vacío dado que el estado previo del motor era apagado y el posterior es con carga. Esto quiere decir que es un arranque del molino SAG, entre ellos corresponde a los eventos: 2, 4, 8, 4, 13. Se observa que existen variaciones en la duración de estos estados de operación en vacío.

Sería interesante realizar un análisis de un tiempo crítico donde sea eficiente mantener el motor operando en vacío, teniendo en cuenta los estados previos y posteriores a este. Hay que considerar que existe una serie de equipos aguas arriba y abajo del Molino SAG que entran en operación junto a él. Por lo tanto, es un tema importante a analizar, más aún considerando que estos motores aportan potencia reactiva inductiva a la red que compensa el factor de potencia. En este sentido, la operación en vacío de un motor síncrono sobreexcitado puede ser utilizada estratégicamente como un mecanismo de soporte al factor de potencia de la planta. Mantener el motor activo en este estado, incluso sin carga mecánica,

permite que la instalación conserve un perfil de potencia dentro de los rangos normativos, evitando penalizaciones económicas y asegurando estabilidad operativa. Así, el análisis del tiempo crítico no solo debe contemplar la eficiencia energética y los costos asociados al vacío, sino también el beneficio adicional de contar con un aporte de potencia reactiva que optimiza el desempeño eléctrico global de la planta. Esta visión integrada refuerza la necesidad de definir umbrales de operación que equilibren eficiencia, disponibilidad y calidad de energía como parte de la estrategia de gestión de estados.

Con la finalidad de tener otro mes para realizar el análisis de operación, se muestra la tabla 7.10 que presenta la cantidad de horas en cada estado. Se tiene que el 74 % del tiempo los motores se encuentran operando con carga, mientras que un 24 % está apagado. El 2 % restante representa la operación en vacío, esta condición se da debido a que el molino SAG cuenta con embragues para enganchar los motores.

Operación	Horas [h]
Apagado	181,5
En vacío	8,95
Con carga	553,53

Tabla 7.10: Operación de los motores Molino SAG en agosto 2025.

A continuación se presentan los eventos de operación en vacío con su respectiva duración, el estado previo y posterior. Hay un total de 19 eventos en los que existe una operación en vacío, de los cuales tres eventos corresponden a los casos en que no es un encendido o apagado de los motores, sino que un estado de operación en vacío como tal.

Evento	Fecha	Duración [min]	Previo	Posterior
1	03-ago-25	6	Con carga	Apagado
2	04-ago-25	13	Apagado	Con carga
3	04-ago-25	1	Con carga	Apagado
4	05-ago-25	35	Apagado	Con carga
5	05-ago-25	232	Con carga	Con carga
6	05-ago-25	1	Apagado	Con carga
7	06-ago-25	3	Con carga	Apagado
8	07-ago-25	29	Apagado	Con carga
9	14-ago-25	16	Con carga	Apagado
10	14-ago-25	6	Apagado	Con carga
11	18-ago-25	2	Con carga	Apagado
12	18-ago-25	22	Con carga	Con carga
13	19-ago-25	1	Con carga	Apagado
14	23-ago-25	21	Apagado	Con carga
15	24-ago-25	1	Con carga	Apagado
16	24-ago-25	8	Apagado	Con carga
17	27-ago-25	79	Con carga	Apagado
18	27-ago-25	7	Apagado	Con carga
19	30-ago-25	36	Con carga	Con carga

Tabla 7.11: Operación en vacío motores Molino SAG en agosto 2025.

Finalmente se agrega el mes de septiembre al análisis de operación de los motores del molino SAG. Se observa en la tabla 7.12 que el 93 % del tiempo se encuentra operando con carga, un 6,9 % está apagado y el resto en vacío.

Operación	Horas [h]
Apagado	49,9
En vacío	1,2
Con carga	667,87

Tabla 7.12: Operación de los motores Molino SAG en agosto 2025.

Finalmente en la tabla 7.13 se presentan los eventos de operación en vacío con su respectiva duración, el estado previo y posterior. Hay un total de once eventos en los que existe una operación en vacío. De los cuales, sólo un evento corresponde al caso en que se encuentra previo y posterior con carga.

Evento	Fecha	Duración [min]	Previo	Posterior
1	02-sep-25	2	Con carga	Apagado
2	02-sep-25	6	Apagado	Con carga
3	03-sep-25	9	Con carga	Apagado
4	03-sep-25	3	Con carga	Con carga
5	12-sep-25	19	Con carga	Apagado
6	12-sep-25	4	Apagado	Con carga
7	15-sep-25	2	Con carga	Apagado
8	15-sep-25	10	Apagado	Con carga
9	22-sep-25	1	Con carga	Apagado
10	22-sep-25	5	Apagado	Con carga
11	29-sep-25	2	Con carga	Apagado

Tabla 7.13: Operación en vacío motores Molino SAG en septiembre 2025.

Capítulo 8

Propuestas de mejora eficiencia energética

En este capítulo se presentan propuestas orientadas a mejorar la eficiencia energética y la calidad de la energía en la operación. Entre ellas, se considera la integración de filtros armónicos en los puntos donde se ha identificado una tasa de distorsión armónica total de corriente superior a lo establecido por la norma [7]. Asimismo, se plantea la compensación de reactivos en el centro de distribución CD 301, dado que presenta un factor de potencia promedio muy bajo y requiere corrección conforme a la normativa vigente [18].

Adicionalmente, se evaluará el impacto de sustituir los motores de las celdas de flotación Wenco 1000 por motores de alta eficiencia, considerando que los actuales poseen varios años de operación y han sido sometidos a reparaciones de rebobinado en el estator. Finalmente, se realizará un monitoreo de los medidores en línea del área de flotación, con el objetivo de identificar posibles diferencias en comparación con los medidores análogos actualmente utilizados.

8.1. Integración de filtros armónicos en CD 300 Y CD 302

8.1.1. Objetivo

Reducir el nivel de armónicos de corriente en la red y compensar potencia reactiva, con el fin de mejorar el factor de potencia y optimizar la calidad de energía en la planta.

8.1.2. Propuesta de mejora

Dado el constante cambio de equipos y la incorporación de nuevas tecnologías en la planta, se plantea evaluar la integración de filtros activos de armónicos, con el propósito de asegurar un monitoreo permanente y un ajuste dinámico de los parámetros de filtrado y compensación. Esta medida busca mitigar el impacto de las cargas no lineales que se introducen en la red eléctrica, reduciendo el contenido de distorsión armónica total (THD). Con ello se pretende mejorar la calidad de la energía, disminuir las pérdidas asociadas a la presencia de armónicos y optimizar el desempeño de los equipos conectados, favoreciendo la eficiencia y confiabilidad del sistema eléctrico. Para ello, es fundamental identificar los

puntos de conexión más adecuados dentro del sistema, priorizando aquellos con mayor concentración de cargas no lineales.

8.1.3. Antecedentes

Del estudio de calidad de energía se identificaron dos puntos en los cuales es necesario mitigar las componentes armónicas de corriente dadas las cargas no lineales conectadas a ellos. Estos corresponden a los centros de distribución CD 300 Y CD 302, donde se tiene un THD de corriente promedio de 9,87 % y 13,91 %, respectivamente, superando al valor de 8 % establecido por la norma. En el caso del THD de tensión, se obtuvieron valores de 2,48 % y 2,6 %, respectivamente.

El centro de distribución CD 302 se alimenta desde un transformador T 302 con una potencia nominal de 2500 [kVA] y una relación de tensión de 12,5/0,5 [kV]. En la medición realizada en la semana del 22 al 28 de julio del presente año, se registraron los valores de potencia detallados en la tabla 8.1.

Valor	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]
Promedio	891,6	743,3	492,9
Máximo	958,5	812,4	513,2

Tabla 8.1: Mediciones de potencia en el CD 302.

Del levantamiento realizado y registrado en la tabla ?? se identificó que en el CCM 600 se encuentran conectados dos variadores de frecuencia operando a la vez, más uno en reserva. Todos estos de una potencia de 350 [HP]. La tabla 8.2 contiene las mediciones de potencia del CCM 600, con todos los equipos operando, el cual consume alrededor del 33 % de la potencia suministrada por el CD 302. Este centro de distribución entrega en promedio una corriente de 1300 [A] hacia las cargas.

Parámetro	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]	$\cos(\phi)$
Valor	244,7	240,8	43,6	0.984

Tabla 8.2: Mediciones de potencia en el CCM 600.

Durante el desarrollo de este informe se encontraron dificultades respecto a los medidores en línea instalados en la planta. Específicamente en este medidor que corresponde al SF720 número 43, hubo pérdida de datos entre los siguientes periodos:

- Desde el 14 de julio hasta el 8 de septiembre.
- Desde el 30 de septiembre hasta el 22 de octubre.

Por lo tanto, durante la medición en el CD302 el registro de mediciones del CCM 600 no quedó grabado. Por esta razón se analizarán los días entre el 15 y el 22 de septiembre para cumplir con el análisis de una semana que establece la norma IEEE-519 [7]. La figura 8.1 presenta la tendencia del THD de corriente durante este periodo. Se observa que alcanza a un valor máximo de 75 % y tiene un promedio de 55 %. En el caso de la distorsión total de tensión se tiene un promedio de 2,91 %.

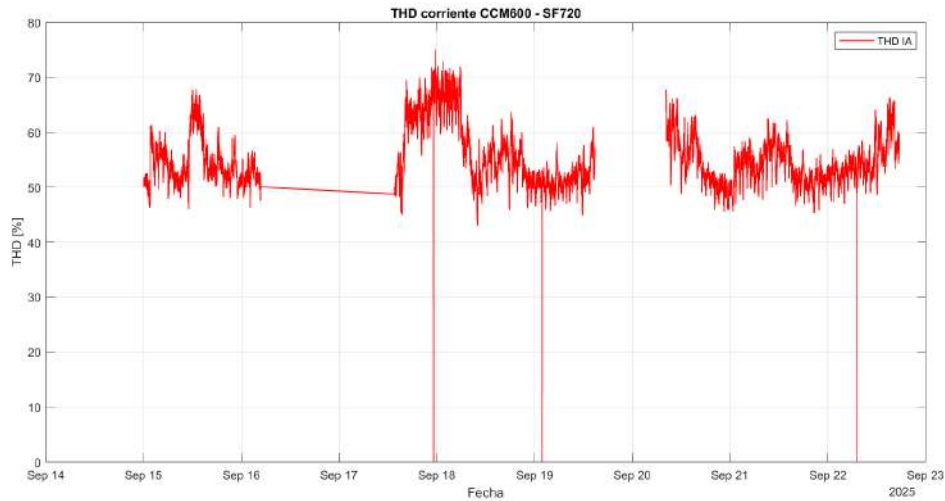


Figura 8.1: Distorsión armónica total de corriente en el CCM 600.

En el momento de la medición se encontraba operando la bomba de remolienda y de relaves que tienen una potencia nominal de 350 [HP], ambas operan con un variador de frecuencia. Se utilizó el medidor en línea para obtener el espectro armónico de la figura 8.2 que al momento de la medición se tiene una corriente total de 443,7 [A].

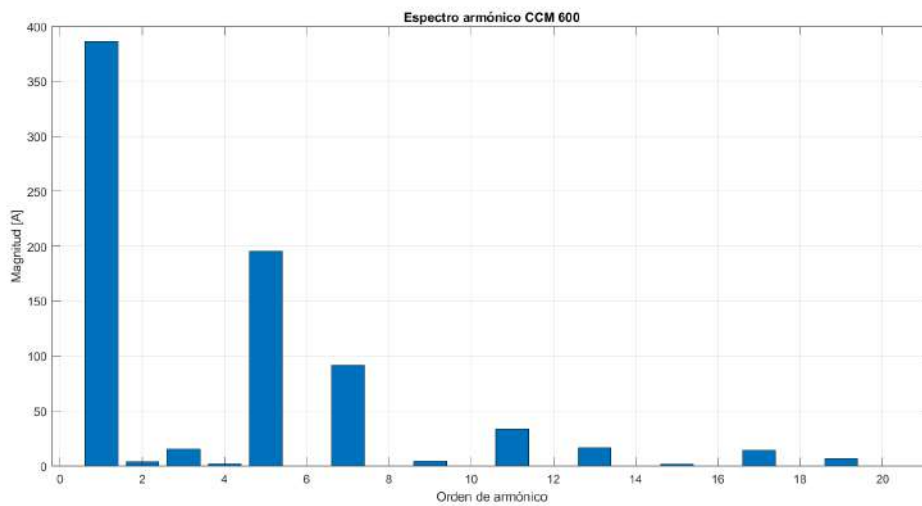


Figura 8.2: Espectro armónico de corriente en el CCM 600.

La corriente total del CCM 600 de 443,7 [A] se reparte en una componente fundamental de 386,4 [A] y una componente armónica de 218,1 [A]. Lo cual si se traduce en una dispersión armónica total tiene como valor:

$$THD_{CCM600} = \frac{218,1}{386,4} \cdot 100 = 56,4\% \tag{8.1}$$

El factor de potencia se ve afectado por esta componente armónica de la siguiente forma:

$$FP = \cos(\phi) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (8.2)$$

Este factor que multiplica al $\cos(\phi)$ en este caso tiene un valor de 0.871, lo cual limita el factor de potencia máximo que puede alcanzar el CCM 600 y que su valor promedio es de 0.857.

En el caso del centro de distribución CD 300 se tiene un consumo promedio de 759,3 [kW] tal como se presenta en la tabla 8.3 y un factor de potencia de 0,781. En el capítulo 4 se realizó un levantamiento de los equipos conectados al CD 300, el cual alimenta once motores de 100 [HP] con partida directa y dos de una potencia de 75 [HP] también con partida directa.

Valor	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]
Promedio	971,8	759,3	606,8
Máximo	1255,4	846,7	958,4

Tabla 8.3: Mediciones de potencia en el CD 300.

Adicional a esas cargas, existen tres fuentes de armónicos, que corresponden a las cargas no lineales correspondientes a variadores de frecuencia que alimentan bombas de rebose de espesadores, bomba hidrociclones del molino 2000 y bombas de piso de relave final. De las nombradas, las bombas de rebose de espesadores cuentan con medidores en línea SFERE 720, los cuales permiten el análisis de calidad de energía. Principalmente al ser variadores de frecuencia se espera que las armónicas predominantes sean la 5ta y 7ma, esto se confirma en la figura 8.3 donde se presenta el espectro armónico de corriente en el CCM 400 que alimenta las bombas de rebose de los espesadores con un variador de frecuencia para una potencia de 100 [HP].

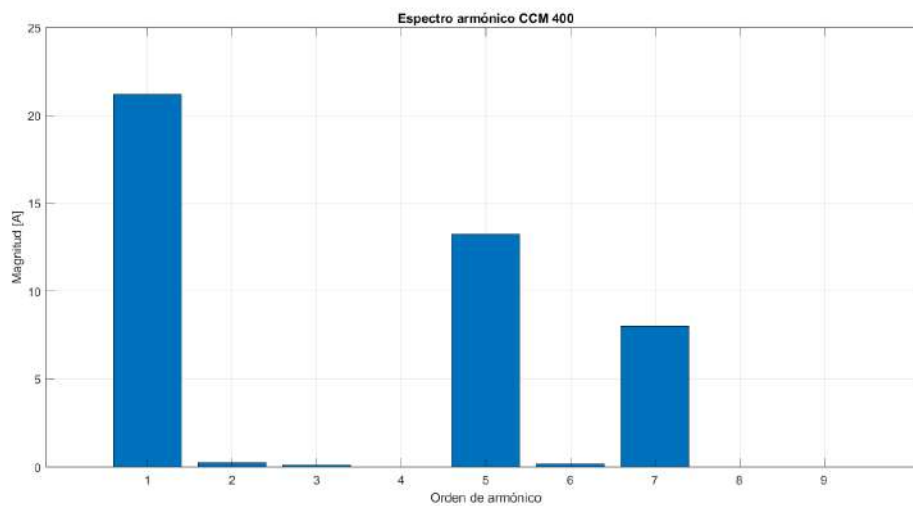


Figura 8.3: Espectro armónico de corriente en el CCM 400.

La corriente total del CCM 400 tiene un valor igual a 26,2 [A] se reparte en una componente fundamental de 21,18 [A] y una componente armónica de 15,47 [A]. Lo cual si se traduce en una dispersión armónica total tiene como valor:

$$THD_{CCM400} = \frac{15,47}{26,22} \cdot 100 = 73,04\% \quad (8.3)$$

El factor de potencia se ve afectado por esta componente armónica y se multiplica por el factor de la ecuación (8.2). Este factor que multiplica al $\cos(\phi)$ en este caso tiene un valor de 0.807, lo cual limita el factor de potencia máximo. La figura 8.4 presenta el gráfico de distorsión armónica de corriente en el CCM 400, se observan dos peaks de 200 % y un promedio de 67,4 %.

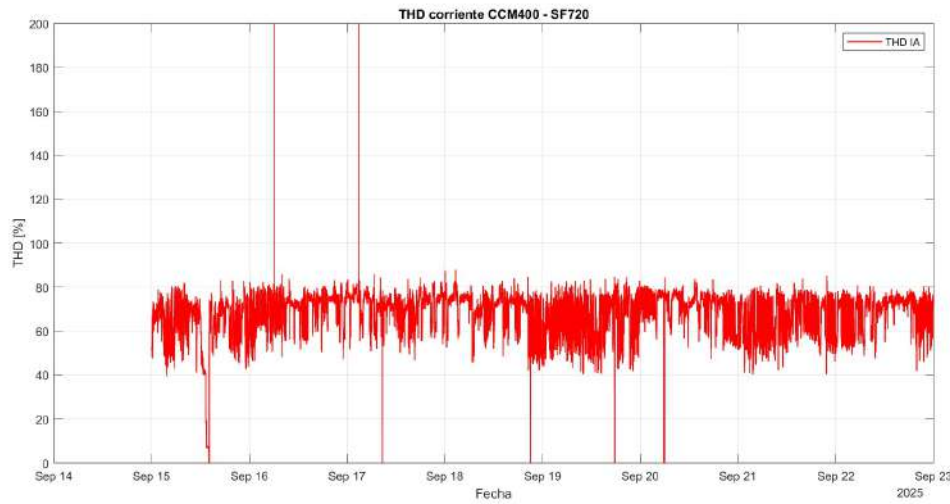


Figura 8.4: Distorsión armónica total de corriente en el CCM 400.

8.1.4. Caso 1: Filtro armónico en CCM 600

Al integrar un filtro armónico en el CCM 600 se busca eliminar las componentes armónicas significativas, que según la figura 8.2, éstas corresponden a la 5ta y 7ma armónica. Para dimensionar el filtro armónico a utilizar en el CCM 600 se utiliza la fórmula entregada por el fabricante [19]:

$$I_{filtro} = I_1 \cdot \frac{THD_{I_1}}{100} \cdot \left(1 + \frac{THD_{v_1}}{10}\right) [A] \quad (8.4)$$

Utilizando los valores obtenidos desde las mediciones, la corriente necesaria para el filtro es:

$$I_{filtro} = 386,6 \cdot \frac{56,4}{100} \cdot \left(1 + \frac{2,92}{10}\right) = 281,7 [A] \quad (8.5)$$

Con esto, el nivel de distorsión armónica, según fabricante, se reduciría a un 8 %. Esto en términos de corriente se verá reflejado:

$$I_{arm} = 386,4 \cdot 8\% = 30,91[A] \quad (8.6)$$

De esta forma, el valor de corriente total quedaría:

$$I_{total} = \sqrt{386,4^2 + 30,91^2} = 387,6[A] \quad (8.7)$$

8.1.4.a. Consecuencias de los armónicos en el CCM 600

Tal como se comentó anteriormente, actualmente hay una tasa de un 55 % en distorsión armónica de corriente en el CCM 600, esto tiene un efecto tanto en el rendimiento de los motores como en sus componentes. La presencia de armónicos elevados produce un deterioro acelerado en la aislación de las bobinas del motor y un aumento de las pérdidas del mismo [20]. Cuando se pierde el aislamiento entre las bobinas del motor ocurre una falla por fuga a tierra entre el conductor y la carcasa del motor, generando un daño en el motor por efectos del calor. Este motor se envía a reparación donde se realiza el rebobinado del estator, el cual reduce entre tres o más puntos de eficiencia en el equipo según [21].

En el análisis de pérdidas en motores de inducción, se consideran distintos tipos: eléctricas por efecto Joule, magnéticas en el núcleo, mecánicas por fricción y ventilación, además de pérdidas adicionales bajo carga. Cuando el motor opera en presencia de armónicos, estas pérdidas se incrementan. En este caso, se tiene un THD de corriente de 55 %, el aumento estimado en las pérdidas resistivas es de aproximadamente 30,25 %, ya que se calcula como el cuadrado del THD de corriente. De forma similar, con un THD de tensión de 2,9 %, el incremento en las pérdidas magnéticas del núcleo sería cercano a 0,084 %. Estos valores permiten dimensionar el impacto de la distorsión armónica en la eficiencia del motor, siendo especialmente relevante el efecto sobre las pérdidas por corriente, que se incrementan de forma significativa.

Es complicado estimar las pérdidas adicionales. Por lo tanto el incremento total de las pérdidas se define con las pérdidas por efecto Joule y de núcleo con valor 30 % [22]. Las pérdidas originales dependen de la potencia nominal que para un motor de 75 hp con una eficiencia de 93,5 %, se tienen alrededor de 3,89 [kW]. Considerando este aumento por efectos de armónicos, las pérdidas del motor tienen un valor de 5,06 [kW].

Así, la nueva eficiencia queda definida por:

$$\eta_2 = \frac{55,9}{55,9 + 5,34} = 91,7\% \quad (8.8)$$

Este valor puede aumentar debido a los rebobinados que tenga el motor [21], pasando a una eficiencia de 87,7 % para un rebobinado y de 83,7 % para dos rebobinados. Por lo tanto, se tiene un efecto en el consumo del equipo y en la eficiencia del proceso.

8.1.4.b. Efecto de la integración del filtro armónico

Al integrar el filtro armónico definido en por la ecuación 8.5 de 281,7 [A], según el fabricante [23] el THD de corriente se reduciría desde el valor de 55 % a un valor de 8 %. Lo que permite que la corriente total se reduzca desde un valor igual a 443,7 [A] a 387,6 [A],

lo que se traduce en una reducción de un 12,8%. Desde el punto de vista de pérdidas por efecto Joule, éstas son proporcionales al valor cuadrático de la corriente total : $P_{joule} \propto I^2$. Al reducir la corriente las pérdidas por efecto Joule se reducen en un 24%. Además, esta reducción contempla alrededor de 60 [A] lo que implica una disminución en la sobrecarga de los equipos como interruptores, transformadores, conductores, entre otros.

En términos de pérdidas internas de los motores conectados a esta red, al tener una tasa de distorsión armónica total de corriente en un 8%, el incremento de las pérdidas se define principalmente el cuadrado del THD, siendo un valor igual a 0,64%. Lo que pasaría de unas pérdidas de 3,89 [kW] a 3,91 [kW] que es despreciable. Por lo tanto, la eficiencia del equipo se mantendría dentro de los valores nominales. Sin embargo, no se tendría una exigencia adicional en la aislación de las bobinas del estator lo que reduciría la probabilidad de que se produzca una falla por fuga a tierra debido al deterioro por calentamiento de la aislación por efecto de los armónicos de corriente.

Para el estudio de consumo energético se utilizará una de las bombas conectadas al CCM 600 que son 3 motores de 350 [HP] equivalentes a 261 [kW] cada una. Se considera un OT de 95%, 720 horas al mes y dos casos: a plena carga y 70% de la potencia nominal.

$$E_{Bomba} = \frac{261 \cdot 0,95 \cdot 720 \cdot OP}{\eta} = \frac{124,967[kWh]}{\eta} \quad (8.9)$$

Se analizan 4 casos de estudio: actual, un rebobinado, dos rebobinados y con filtro. Esto se refleja en la tabla 8.4.

Casos	Eficiencia	Consumo al 70% [kWh]	Consumo nominal [kWh]
Actual	91,7%	136.278	194.683
1 rebobinado	87,7%	142.494	203.562
2 rebobinados	83,7%	149.303	213.291
Con filtro	93,5%	133.655	190.935

Tabla 8.4: Consumos mensuales para cada caso en el CCM 600.

La tabla 8.5 presenta el ahorro energético estimado para cada caso al implementar el filtro.

Casos	70% Nominal		Nominal	
	E [kWh]	USD	E [kWh]	USD
Actual	2.624	236,1	3.748	337,3
Actual con 1 rebobinado	8.839	795,5	12.627	1.136,5
Actual con 2 rebobinados	15.649	1.408,4	22.356	2.012,0

Tabla 8.5: Ahorro energético mensual para cada caso en el CCM 600.

Sin embargo, al integrar el filtro armónico en el CCM 600 se reduce considerablemente la principal fuente de armónicos que tiene el centro de distribución CD302. El CCM 314 cuenta con 2 celdas de flotación Wenco 3000 de 200 [HP], pero tienen partidador suave, por lo tanto sólo introducen armónicos a la red en el arranque del motor y para efectos de este estudio se analiza el régimen permanente. En los antecedentes del caso se observó que el CCM 600 consume alrededor del 33% del total del CD 302, por lo tanto una reducción

de los armónicos en este punto afecta notablemente en la calidad de energía del centro de distribución. Para tener una estimación del efecto que tendría bajar el THD de corriente en el CCM 600 usamos la siguiente relación:

$$THD_{302} = \frac{I_{600}}{I_{302}} \cdot THD_{600} \quad (8.10)$$

Utilizando la ecuación (8.10) para una corriente de 440 [A] en el CCM 600 y de 1300 [A] en el CD 302, considerando que el THD de corriente en el CCM 600 se reduce a un 8 %, THD de corriente del CD 302 tiene un valor de 2,7 % quedando en un valor permitido por la norma. Además, se reducen las pérdidas por el efecto de la distorsión de corriente.

8.1.4.c. Evaluación económica de la solución

Para este análisis se considera el ahorro energético mensual indicado en la tabla 8.5 para los motores del CCM 600, proyectado a un horizonte anual. Se evalúan dos escenarios: el caso actual operando al 70 % de carga y el caso con un rebobinado. Se mantiene constante el precio de la energía en 0,09 [USD/kWh], una vida útil de 10 años y una tasa de descuento del 10 %. El ahorro energético anual en el caso actual alcanza los USD 2.835, mientras que en el caso con un rebobinado asciende a USD 9.531. Adicionalmente, se considera un ahorro por fallas evitadas de USD 3.200 anuales A.2 (considerando una falla por año) , asociado a la reducción de eventos de rebobinado y daños térmicos. En consecuencia, el ahorro total anual estimado es de USD 6.035 para el caso actual y USD 12.731 para el caso con un rebobinado.

En la tabla 8.6 se detalla el valor del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación para ambas alternativas de inversión.

Escenario	Alternativa	VAN [USD]	TIR [%]	Recuperación [años]
Actual 70 %	USD 37.000	80	10,1	6,13
Actual 70 %	USD 47.000	-8.804	8,4	7,79
1 rebobinado 70 %	USD 37.000	41.220	28,7	2,91
1 rebobinado 70 %	USD 47.000	31.270	22,1	3,69

Tabla 8.6: Evaluación económica considerando CCM 600 al 70 % de carga.

La integración del filtro armónico en el CCM 600 resulta económicamente viable en el escenario con rebobinado, donde los beneficios energéticos y de mantenimiento justifican la inversión tanto en la alternativa de USD 37.000 como en la de USD 47.000, con VAN positivos y periodos de recuperación inferiores a 4 años. En el caso actual, la alternativa de USD 37.000 apenas alcanza un VAN cercano a cero, mientras que la de USD 47.000 presenta un VAN negativo, lo que refleja una menor conveniencia económica. Este análisis evidencia que la reducción de armónicos en puntos críticos como el CCM 600 no solo mejora la calidad de energía del CD 302, sino que también constituye una estrategia rentable para disminuir fallas térmicas y sobrecargas en equipos.

8.1.5. Caso 2: Filtro activo en CD 302

El fabricante entrega un paso a paso para dimensionar el filtro activo. Se establece que el filtro opera en la siguiente secuencia de priorización: filtrado armónico, compensación de reactivos y equilibrio de fases. Para el dimensionamiento de este equipo el fabricante entrega las siguientes fórmulas [19]:

$$I_{active,filter} = \sqrt{I_{harmonics}^2 + I_{reactive}^2 + I_{load}^2} \quad (8.11)$$

Donde:

$$I_{harmonics} = I_{total} \cdot \sqrt{\frac{THD_I^2}{100^2 + THD_I^2}} \cdot \left(1 + \frac{THD_v}{10}\right) \quad (8.12)$$

$$I_{reactive} = \frac{Q_{ph}}{V_{ph}} \quad (8.13)$$

$$I_{load} = \max \begin{cases} I_{promedio} - I_{min} \\ I_{max} - I_{promedio} \end{cases} \quad (8.14)$$

Una forma de saber la corriente armónica que se debe filtrar es con la fórmula (8.12) donde se obtiene un valor de 207,4 [A]. La otra forma es observando la figura 8.5 donde la corriente I_{filtro} corresponde a la corriente de la carga multiplicado por el THD de corriente. En el gráfico, el mayor valor alcanzado es de 195,9 [A]. Para efectos de estudio, se utiliza el de mayor valor correspondiente a lo obtenido con la ecuación (8.12).

En el caso de los reactivos, de la tabla 8.1 se observa que el máximo valor de potencia reactiva es de 513,2 [kVAr], esto concuerda con el gráfico de la figura 8.5 donde se llega a 171 [kVAr] como máximo por fase. La idea es compesar el factor de potencia llevando desde un valor promedio igual a 0,833 a lo establecido por la norma de 0,93. Para esto se requiere una compensación de 200 [kVAr]. Utilizando la ecuación (8.13) se obtiene una corriente de:

$$I_{reactive} = \frac{200/3}{400/\sqrt{3}} = 288,7[A] \quad (8.15)$$

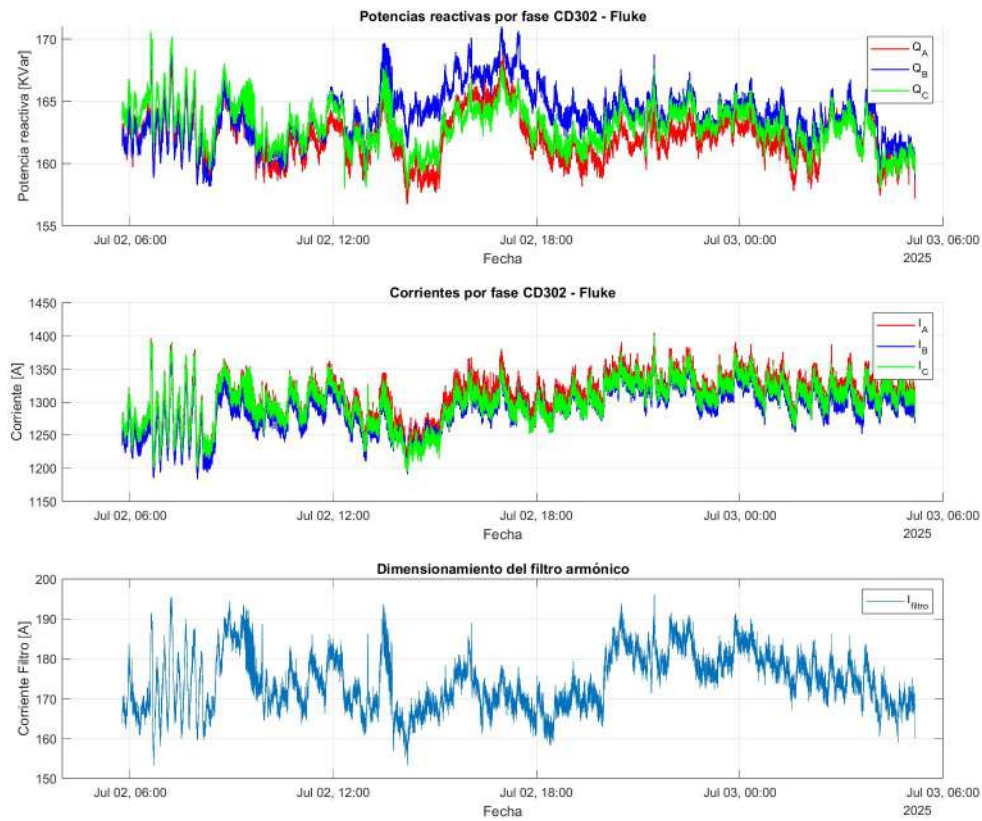


Figura 8.5: Dimensión del filtro activo por mediciones.

También se obtiene el desbalance de carga en el punto de máxima potencia reactiva, donde se alcanza una corriente:

- $I_a = 1365$ [A]
- $I_b = 1342$ [A]
- $I_c = 1348$ [A]

Con estos valores y la ecuación (8.14), se obtiene un valor de I_{load} igual a 13 [A]. Finalmente, con la ecuación (8.11) y los valores calculados, la corriente a la que se debe dimensionar el filtro para compensar las 3 funciones es de:

$$I_{active,filter} = \sqrt{207,4^2 + 288,7^2 + 13^2} = 355,7[A] \quad (8.16)$$

8.1.5.a. Efecto de la integración del filtro activo

Tal como se comentó en el caso anterior, la presencia de armónicos genera un impacto en la eficiencia de los motores debido al aumento de las pérdidas internas del motor y un deterioro del aislamiento de las bobinas del mismo. Para darle una mirada desde el punto de vista energético se plantea un caso estudiando los motores de 100 [HP] que se encuentran alimentados en los CCM conectados al CD 302. Considerando una eficiencia nominal de 93,5% se tienen pérdidas internas de 5,18 [kW]. Del estudio de calidad de energía se sabe que el THD de corriente es de 13,91% y el de tensión 2,6%, con estos valores las pérdidas internas del motor aumentan en un 2%. Si embargo, estos motores no se encuentran conectados directamente al CD 302, es por esta razón que para efectos de estudio se analizarán tres casos de eficiencia debido a estas pérdidas eléctricas adicionales. En la tabla 8.7 se presentan los cuatro casos de estudio.

Casos	Eficiencia	Consumo al 70% [kWh]	Consumo nominal [kWh]
Actual	92,5%	55.163	78.805
1 rebobinado	88,5%	57.591	82.273
2 rebobinados	84,5%	60.314	86.163
Con filtro	93,5%	54.573	77.962

Tabla 8.7: Consumos mensuales para un motor de 100 HP en el CD 302.

La tabla 8.8 presenta el ahorro energético de los siete motores de 100 HP conectados en el CD 302 para los tres casos de estudio a potencia nominal y al 70% de la carga. Se observa que la eficiencia del motor no se ve afectada considerablemente por la tasa actual de distorsión armónica; no obstante, la presencia de esta distorsión puede ser causa de una degradación progresiva del aislamiento que, a la larga, genera una falla por fuga a tierra. En este contexto, es frecuente que, por motivos de urgencia operativa y necesidad de disponibilidad rápida, los motores sean enviados a talleres de menor costo para acelerar la salida de la reparación. Esta práctica, si bien resuelve la contingencia inmediata, puede comprometer la aplicación de buenas prácticas de rebobinado y reparación, afectando directamente la eficiencia energética del equipo. Según el fabricante ABB [21], la reducción de la eficiencia puede ser de 3 o más puntos porcentuales por reparación. Asimismo, el estudio EASA/AEMT [24] demuestra que, cuando se siguen buenas prácticas, la eficiencia se conserva; sin embargo, en este análisis se considera una reparación deficiente, caracterizada por alteración del diseño electromagnético y deficiente aislamiento. Estas condiciones han sido asociadas en la literatura técnica con pérdidas de eficiencia típicas entre 1% y 5%, lo que refuerza la importancia de asegurar procesos de reparación bajo estándares reconocidos para evitar impactos económicos y energéticos significativos.

Casos	70%		Nominal	
	E [kWh]	USD	E [kWh]	USD
Actual	4.130	371,7	5.900	531,0
Actual con 1 rebobinado	20.717	1.864,5	29.595	2.663,6
Actual con 2 rebobinados	39.407	3.546,7	56.296	5.066,7

Tabla 8.8: Ahorro energético mensual para los equipos alimentados por el CD 302.

En temas de cumplimiento normativo se reduciría del THD de corriente desde un

13,9% en promedio hasta un 5%, lo que permitiría estar dentro del 8% definido por la norma.

En términos de factor de potencia, al utilizar el filtro activo se reducen alrededor de 200 [kVar] en el centro de distribución CD 302, mejorando el factor de potencia a 0,93. Con esto se obtiene una reducción de la potencia aparente desde 890 a 800 [kVA], lo que en corriente se traduce en 130 [A] menos reduciendo las pérdidas por efecto Joule en un 9%.

8.1.5.b. Evaluación económica de la solución

Para esta evaluación se consideran los ahorros energéticos mensuales indicados en la tabla 8.8 para los motores alimentados por el CD 302, escalados a un horizonte anual. Se analizan dos escenarios: el caso actual al 70% de carga y el caso con 1 rebobinado al 70%. Se mantiene el precio de la energía en 0,09 [USD/kWh], una vida útil de 10 años y una tasa de descuento del 10%.

El ahorro energético anual en el caso actual operando al 70% corresponde a 4.130 [kWh/mes] lo que se traduce en USD 4.459. En contraste, el ahorro energético anual en el caso con un rebobinado al 70% asciende a 20.717 [kWh/mes] que son USD 22.374. Además, el ahorro por fallas evitadas se mantiene en USD 3.200 anuales A.2, debido a la reducción de eventos de rebobinado y daños térmicos. Por lo tanto, el ahorro total anual es de USD 7.659 en el caso actual y de USD 25.574 en el caso con un rebobinado.

En la tabla 8.9 se presentan los valores del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación para ambas alternativas de inversión.

Escenario	Alternativa	VAN [USD]	TIR [%]	Recuperación [años]
Actual 70 %	USD 37.000	10.083	16,5	4,83
Actual 70 %	USD 47.000	429	10,9	6,14
1 rebobinado 70 %	USD 37.000	120.400	58,0	1,45
1 rebobinado 70 %	USD 47.000	110.622	33,6	1,84

Tabla 8.9: Evaluación económica considerando casos al 70% de carga.

La integración del filtro activo resulta económicamente viable en ambos escenarios analizados. En el caso actual al 70% de carga, la alternativa de menor costo (USD 37.000) presenta un periodo de recuperación más rápido (4,83 años) y un VAN positivo de USD 10.083, mientras que la alternativa de mayor inversión apenas supera el punto de equilibrio financiero. En cambio, bajo el escenario con un rebobinado, los beneficios energéticos aumentan significativamente, elevando el VAN a USD 120.400 y USD 110.622 para las alternativas de USD 37.000 y USD 47.000 respectivamente, con periodos de recuperación inferiores a dos años. Este análisis evidencia que la degradación térmica inducida por armónicos no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también representa un costo económico relevante. Su mitigación mediante filtrado activo constituye una estrategia técnica y financieramente sólida.

8.1.6. Caso 3: Filtro activo en CD 300

Para dimensionar el filtro activo se tiene en cuenta una distorsión armónica promedio de corriente igual a 9,87% y de tensión 2,48%. Al igual que en el caso 2, el fabricante entrega el procedimiento para dimensionar el filtro [19]. Se utiliza la ecuación 8.5 para una corriente promedio de 1428,4 [A] obteniendo un valor de $I_{harmonics}$ igual a 175,9 [A].

La figura 8.6 presenta la tendencia de las potencias reactivas por fase en el CD300 durante la medición de junio del presente año. Se observa que el punto de máxima potencia se alcanza el 27 de junio a las 20:23:55 hrs, donde se llega a un valor de 224,8 [kVar] en la fase A. Además, se obtiene el punto de máxima corriente a filtrar con un valor de 187,4 [A].

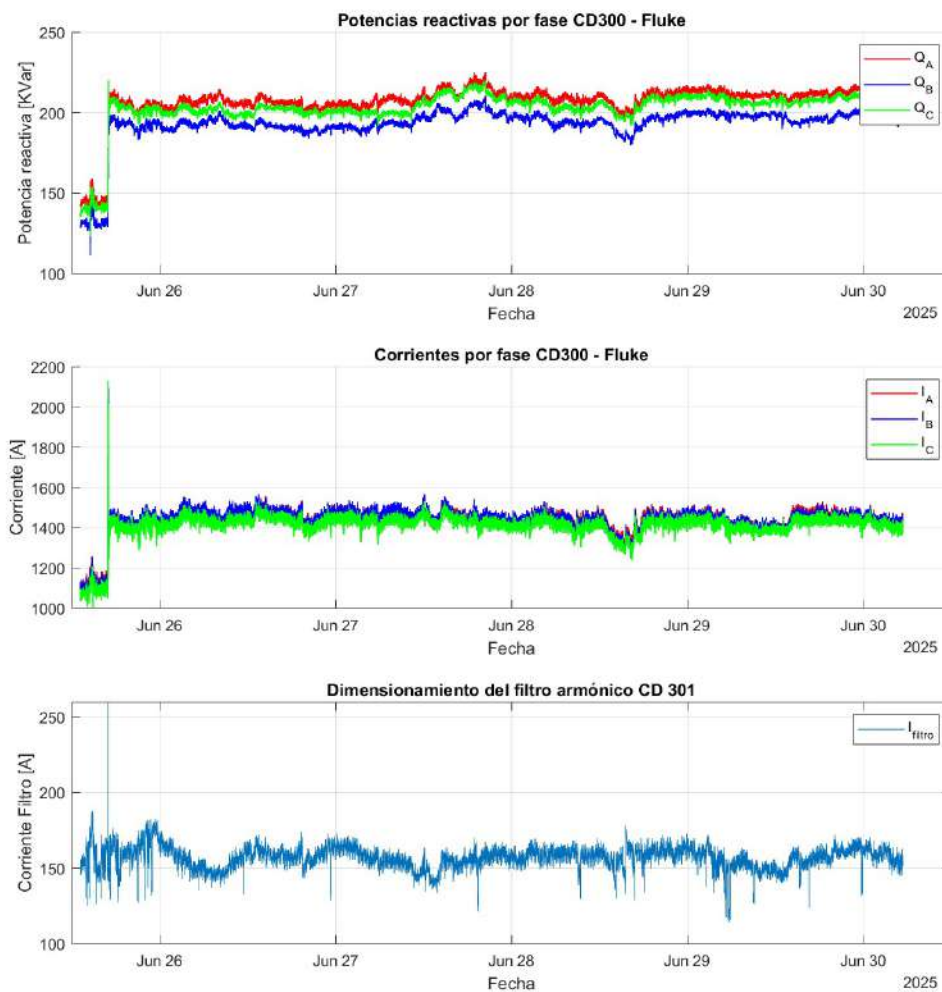


Figura 8.6: Dimensión del filtro activo por mediciones en CD 300.

También se obtiene el desbalance de carga en el punto de máxima potencia reactiva, donde se alcanza una corriente:

- $I_a = 1472$ [A]
- $I_b = 1485$ [A]
- $I_c = 1444$ [A]

Con estos valores y la ecuación (8.14), se obtiene un valor de I_{load} igual a 23 [A]. Finalmente, con la ecuación (8.11) y los valores calculados, la corriente a la que se debe dimensionar el filtro para compensar las 3 funciones es de:

$$I_{active,filter} = \sqrt{187,4^2 + 433^2 + 23^2} = 472,2[A] \quad (8.17)$$

La idea principal del filtro activo es priorizar el filtrado de las componentes armónicas de corriente que se encuentran en el CD 300, por lo tanto el efecto de la compensación reactiva pasa a segundo plano. En conversaciones con el equipo de mantención eléctrica planta se definió que ambos filtros activos serían de 400 [A] como máximo. Por lo tanto, para este caso se debe limitar tanto la función de equilibrio de fases como la de compensación reactiva, quedando distribuida de la siguiente forma:

$$I_{active,filter} = 400 = \sqrt{187,4^2 + I_{reactive}^2} \quad (8.18)$$

Despejando la ecuación (8.18) se obtiene una corriente $I_{reactive}$ igual a 353,3 [A]. Utilizando la ecuación (8.13) se obtiene una potencia reactiva de Q_{ph} de 81,23 [kVar] equivalentes a 243,8 [kVar] trifásicos. Con esta compensación se obtendría el siguiente factor de potencia:

$$FP_{CD302,esperado} = \frac{759,3}{\sqrt{759,3^2 + (606,8 - 243,8)^2}} = 0,902 \quad (8.19)$$

8.1.6.a. Efecto de la integración del filtro activo

Al integrar el filtro armónico se reduce la distorsión armónica total de corriente pasando de un valor igual a 9,87% a un 5% según el fabricante. Con esta reducción se logra mantener este valor de armónicos dentro del 8% establecido por la normativa. Además, se reducen los reactivos de la red, pasando en promedio de 600 [kvar] a 400 [kvar], lo que se traduce en una mejora del factor de potencia pasando de 0,78 a 0,9. Con esto se reduce la potencia aparente desde 970 [kVA] a 840 [kVA], reduciendo las corrientes en un 15% y a su vez las pérdidas por efecto Joule en un 20%. La tabla 8.10 presenta el valor del consumo eléctrico para los tres casos de estudio.

Casos	Eficiencia	Consumo al 70 % [kWh]	Consumo nominal [kWh]
Actual	93,5 %	54.573	77.962
1 rebobinado	89,5 %	57.012	81.446
2 rebobinados	85,5 %	59.680	85.256

Tabla 8.10: Consumos mensuales de un motor de 100 HP para los casos planteados en el CD 300.

De los once motores de 100 [HP] alimentados por este CD, para el caso de estudio en ahorro energético se consideran 5 motores de 100 HP con uno y dos rebobinados debido a la reparación por desgaste en el aislamiento. El potencial ahorro respecto a la condición actual se presenta en la tabla 8.11.

Casos	70 %		Nominal	
	E [kWh]	USD	E [kWh]	USD
Actual con 1 rebobinado	12.195	1.097,6	17.422	1.567,9
Actual con 2 rebobinados	25.531	2.297,8	36.473	3.282,6

Tabla 8.11: Ahorro energético mensual estimado para los equipos alimentados por el CD 300.

8.1.6.b. Evaluación económica de la solución

Para la evaluación económica se analizaron dos alternativas para la adquisición e instalación de un filtro activo de armónicos. La primera alternativa corresponde a un filtro de menor calidad y costo de USD 37.000, mientras que la segunda alternativa contempla un filtro premium a un costo de USD 47.000.

La integración del filtro permite reducir la distorsión armónica total de corriente (TH-Di) desde 9,87 % hasta 5 %, cumpliendo con el límite del 8 % establecido por la normativa interna. Asimismo, se reduce la potencia reactiva promedio de 600 [kVAr] a 400 [kVAr], mejorando el factor de potencia de 0,78 a 0,9. Esto conlleva una disminución de la potencia aparente desde 970 [kVA] a 840 [kVA], reduciendo las corrientes en un 15 % y las pérdidas por efecto Joule en un 20 %.

En términos energéticos, esta mejora se traduce en un ahorro anual estimado de 140.000 [kWh], considerando un precio promedio de 0,09 [USD/kWh], equivalente a un ahorro monetario de aproximadamente USD 12.600 anuales.

En cuanto a los costos de mantenimiento, los equipos sin filtrado adecuado presentan fallas prematuras asociadas a armónicos y desequilibrios térmicos. Los costos de reparación por rebobinado de motor ascienden a USD 1.500, sin embargo, considerando mantenciones adicionales y reparaciones asociadas a daños en aislamiento y componentes electrónicos, el costo total promedio de cada evento de falla se estima en USD 4.000. Con la instalación del filtro activo se espera disminuir la frecuencia de estas fallas.

Se consideró una vida útil de 10 años para el filtro activo y una tasa de descuento del 10 %. La depreciación se calculó mediante el método lineal, de modo que el valor del filtro se reduce uniformemente a lo largo de su vida útil. El flujo neto de caja considera los ahorros energéticos anuales y la reducción en costos de mantenimiento.

Concepto	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo de inversión inicial	[USD]	37.000	47.000
Ahorro energético anual	[USD/año]	12.600	12.600
Ahorro por fallas evitadas	[USD/año]	3.200	3.200
Ahorro total anual	[USD/año]	15.800	15.800
Vida útil	[años]	10	10
Tasa de descuento (TIR)	[%]	10	10
Valor actual neto (VAN)	[USD]	80.703	72.203
Tasa interna de retorno (TIR)	[%]	42	33
Periodo de recuperación	[años]	2,34	2,97

Tabla 8.12: Evaluación económica de filtros activos considerando una vida útil de 10 años.

De acuerdo con la evaluación realizada en la tabla 8.12, ambas alternativas resultan económicamente viables. Sin embargo, la alternativa de USD 37.000 presenta un periodo de recuperación menor y una Tasa Interna de Retorno superior, debido a su menor inversión inicial y beneficios energéticos equivalentes. La alternativa de USD 47.000 puede justificarse en caso de requerir un mayor margen de reducción armónica o una vida útil extendida en condiciones más exigentes.

8.2. Compensación de reactivos en CD 301

8.2.1. Objetivo

Compensar la potencia reactiva en el CD 301, esto con el fin de mantener el factor de potencia dentro de la normativa además de reducir pérdidas eléctricas y sobrecarga de los equipos.

8.2.2. Propuesta de mejora

Implementar bancos de condensadores con bobinas de rechazo de forma de compensar la potencia reactiva que se encuentra en valores elevados superando incluso a la potencia activa.

8.2.3. Antecedentes

En el estudio de calidad de energía realizado durante la elaboración de este informe, se realizó el levantamiento de los equipos que se encuentran alimentados por este centro de distribución. Dentro de estos equipos se encuentran 13 motores de las celdas de flotación Wenco 1500 y otros equipos con bajo consumo. Todos estos operan con partida directa, por lo tanto no hay cargas no lineales del tipo variador de frecuencia que generen componentes armónicas. La medición se realizó durante los días 9 y 13 de julio, obteniendo una distorsión armónica de corriente y tensión de 3,27 % y 1,1 %, respectivamente, mientras que el factor de potencia tiene un valor de 0,6439, muy por debajo de la norma que establece un mínimo de 0,93.

Valor	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]	FP
Promedio	1064,5	679,5	819,5	0,6439
Máximo	1242,8	810,3	942,4	0,6794

Tabla 8.13: Mediciones de potencia en el CD 301.

8.2.4. Caso 1: Banco de condensadores en CD 301

Actualmente, el factor de potencia se encuentra un 69% bajo lo establecido por la norma de calidad de servicio de la CNE [18]. Se establece que para este nivel de tensión, el factor de potencia debería estar sobre 0,93. Lo que considerando la potencia activa presentada en la tabla 8.13 la potencia aparente, considerando este factor establecido por la norma, tendría un valor promedio de 730 [kVA] y un máximo de 871 [kVA]. Esto reduciría considerablemente la potencia aparente del sistema y a su vez las corrientes a las cuales se encuentra sometido. La figura 8.7 presenta la tendencia de las potencias, factor de potencia y distorsión armónica en el CD 301.

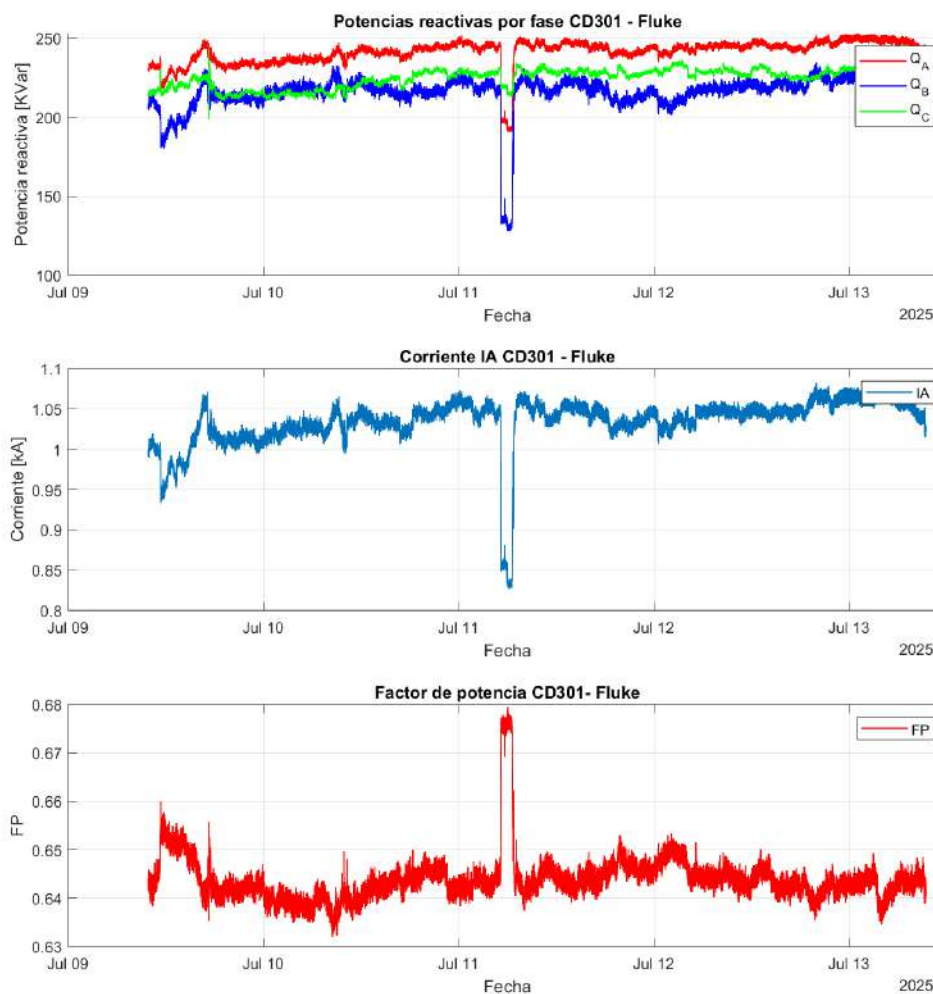


Figura 8.7: Dimensión del banco de condensadores por mediciones en CD 301.

Utilizando una potencia promedio de 730 [kVA] y considerando un factor de potencia esperado de 0,93, se obtiene una potencia reactiva equivalente a 268 [kVAr]. En contraste, el sistema actualmente presenta una demanda de potencia reactiva de 819,5 [kVAr], lo que evidencia un exceso que debe ser corregido. Para alcanzar el nivel de compensación requerido, es necesario reducir dicha potencia reactiva en 551,2 [kVAr]. En consecuencia, se requiere la instalación de un banco de condensadores con estas características, de manera que se logre mejorar el factor de potencia del sistema y optimizar el desempeño energético de la operación.

La integración de un banco de 551,2 kVAr en el CD 301 eleva el factor de potencia desde 0,6439 hasta 0,93, disminuye la potencia aparente (-31,4%), reduce corrientes en el lado 400 V en torno a un 31% y libera capacidad operativa en el centro de distribución. Al estar aguas abajo de la barra fiscalizable, no altera penalizaciones externas, pero reduce pérdidas internas, caída de tensión y calentamiento en alimentadores y barras, mejorando confiabilidad y margen térmico.

A continuación, en la Tabla 8.14 se presentan los tramos principales considerados en la evaluación técnica. Se incluyen tanto el alimentador en media tensión como la salida en baja tensión del transformador hacia el CD 301, detallando su configuración constructiva y la longitud efectiva de cada fase. Estos parámetros son relevantes para dimensionar las pérdidas por efecto Joule y cuantificar el impacto de la compensación de reactivos.

Tramo	Configuración	Longitud efectiva
Alimentador	Cable 500 MCM XLPE 3×1c	20 m
Salida	Barras de cobre 10×1 cm, 4 barras/fase	5 m

Tabla 8.14: Tramos y configuraciones considerados en la evaluación técnica.

En la Tabla 8.15 se resumen los resultados de la estimación de pérdidas por efecto Joule en los tramos evaluados, tanto en condición actual como con la compensación de reactivos implementada. Se observa una reducción significativa de las pérdidas en ambos tramos, lo que se traduce en un ahorro energético anual calculado considerando una operación efectiva del 95 % de las horas del año.

Tramo	Actual [kW]	Compensado [kW]	Ahorro anual [kWh]
Alimentador	0,009	0,004	38
Salida	0,188	0,087	832
Total	0,197	0,091	870

Tabla 8.15: Reducción de pérdidas por efecto Joule y ahorro energético anual, operación efectiva del 95 %.

El centro de distribución CD 301 es alimentado por un transformador de 12/0,4 kV y $S_{\text{nom}} = 2500$ kVA. La corriente nominal en el secundario (400 V) es:

$$I_{\text{FL}} = \frac{S_{\text{nom}}}{\sqrt{3} \cdot V_{\text{LV}}} = \frac{2500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \text{ kV}} = 3608 \text{ A}$$

En el análisis realizado se observa que la potencia activa promedio es de 679,5 [kW] con un factor de potencia inicial de 0,6439, muy por debajo del valor objetivo de 0,93. Bajo esta condición, la potencia aparente alcanza 1064,5 [kVA], mientras que al corregir el factor de potencia se reduce a 731,7 [kVA]. Esta disminución se refleja directamente en la corriente del sistema, que pasa de 1536 [A] a 1056 [A] en el lado de baja tensión del transformador. Al comparar estas corrientes con la nominal de 3608 [A], se obtiene una relación de carga de 0,4256 antes de la compensación y de 0,2926 después, lo que evidencia una reducción significativa en el esfuerzo eléctrico del transformador y en las pérdidas asociadas a su operación.

Se descomponen las pérdidas totales en vacío y en carga, según IEC 60076-1 e IEEE C57 [25, 26]:

$$P_{\text{tot}}(I, T) = P_0(T) + P_{\text{carga}}(I, T), \quad P_{\text{carga}}(I, T) = P_{\text{carga,FL}}(T) \cdot x^2$$

donde P_0 son pérdidas en vacío (independientes de la carga), $P_{\text{carga,FL}}(T)$ las pérdidas en carga a plena carga (cobre+dispersión) a la temperatura de operación T y x corresponde

al factor de carga que relaciona la corriente real y la nominal. El ahorro instantáneo por compensación de reactivos es:

$$\Delta P_{\text{trafo}} = P_{\text{carga,FL}}(T) \cdot (x_{\text{antes}}^2 - x_{\text{desp}}^2)$$

Con los valores anteriores:

$$\Rightarrow \Delta P_{\text{trafo}} = 0,0955 \cdot P_{\text{carga,FL}}(T)$$

Si las pérdidas en carga se reportan a una temperatura de referencia T_{ref} de 75°C , ajuste resistivo:

$$P_{\text{carga,FL}}(T) = P_{\text{carga,FL}}(T_{\text{ref}}) \cdot \frac{R(T)}{R(T_{\text{ref}})}, \quad R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha (T - 20^{\circ}\text{C})], \quad \alpha = 0,00393 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Considerando un régimen de 720 horas mensuales con un factor de operación del 95 %, se obtiene una disponibilidad anual de 8208 horas. A una temperatura de operación de 95°C , el ajuste de resistencia en los devanados entrega un factor de corrección de 1,604, mientras que las pérdidas típicas del transformador se sitúan en torno al 1 % de su potencia nominal. Bajo estas condiciones, la energía en ahorro queda determinada por la interacción entre las horas efectivas de funcionamiento, el factor de corrección térmico y las pérdidas de carga características del equipo, constituyendo la base para la estimación del beneficio energético de la compensación:

$$E_{\text{ahorro, trafo}} = 0,0955 \cdot (2500[\text{kVA}]) \cdot 1 \% \cdot 1,064 \cdot 8208 = 20,850[\text{kWh}]$$

8.2.4.a. Evaluación económica de la solución

Considerando el ahorro por pérdidas en el transformador y en los tramos de alimentador y barras, y cotizando con la empresa Schneider se considera inversión de 37.000 USD, vida útil 20 años, depreciación lineal del 5 % anual, operación efectiva del 95 % y tarifa promedio de 0,09 USD/kWh. Se reportan indicadores bajo dos enfoques de flujo: operacional (solo ahorro energético) y contable (ahorro menos depreciación). Los resultados se detallan en la tabla 8.16.

Parámetro	Compensación en CD 301
Ahorro anual de energía [kWh]	21.720
Ahorro anual [USD]	1.955
Inversión inicial [USD]	37.000
Depreciación anual [USD]	1.850
Flujo anual operacional [USD]	1.955
Flujo anual contable [USD]	105
VAN (10%) operacional [USD]	-20.800
VAN (10%) contable [USD]	-36.650
TIR [%]	-
Payback descontado [años]	-

Tabla 8.16: Indicadores económicos para la compensación de reactivos en CD 301 considerando pérdidas de carga del transformador y tramos de baja tensión.

El beneficio económico directo por reducción de pérdidas en los tramos evaluados es acotado respecto a la inversión, por lo que el VAN energético aislado es negativo con el criterio contable aplicado. El valor principal de la medida reside en la mejora técnica: cumplimiento de factor de potencia, reducción de corrientes y potencia aparente, menor calentamiento y caída de tensión, y liberación de capacidad para la operación del CD 301.

8.3. Motores de alta eficiencia en celdas de flotación Wenco 1000

8.3.1. Objetivo

Reducir el consumo de energía eléctrica en las celdas de flotación Wenco 1000 mediante el cambio a motores de alta eficiencia.

8.3.2. Propuesta de mejora

Evaluar de forma técnica y económica el cambio de 10 motores de 75 [HP] ubicados en la sección Scavenger de flotación los cuales son parte de las celdas de flotación Wenco 1000. Actualmente los motores se encuentran operando con baja carga y tienen varias reparaciones en su vida útil.

8.3.3. Antecedentes

La flotación Scavenger es una sección del proceso de flotación. Se constituye por 10 celdas de flotación Wenco 1000 que operan en conjunto con 2 bombas de impulsión hacia remolienda. Del capítulo de contexto energético se observó que en el año 2024, las celdas de flotación corresponden al 33 % del consumo eléctrico total de Flotación. Sin embargo, durante el año 2025 hasta la fecha de septiembre, el consumo eléctrico de las celdas corresponde al 43 %. En el caso de las celdas Wenco 1000, representan el 17 % del consumo de las celdas de flotación completas y un 7,1 % del consumo total de flotación. Por lo tanto, una mejora en este punto tiene influencia en el área completa.

Hay que tener en cuenta que estos motores se encuentran consumiendo alrededor del 60 % de su potencia nominal, y con dos o tres rebobinados debido a fallas por fuga a tierra. Según el fabricante se establece que por cada rebobinado se disminuye entre 3 o más puntos porcentuales de la eficiencia [21].

Los motores que se encuentran operando son de la marca Reliance en 400 [V], con una potencia nominal de 75 HP con un frame de 405 TY. Según placa la eficiencia nominal es del 93,5 %. Según la norma IEC 60034-2-1 [22] se indica que se debe seleccionar adecuadamente la potencia del motor según los requerimientos de la carga, y se establece que el punto óptimo se encuentra entre un 75 % y 100 % de plena carga. La figura 8.8 presenta la curva característica del motor:

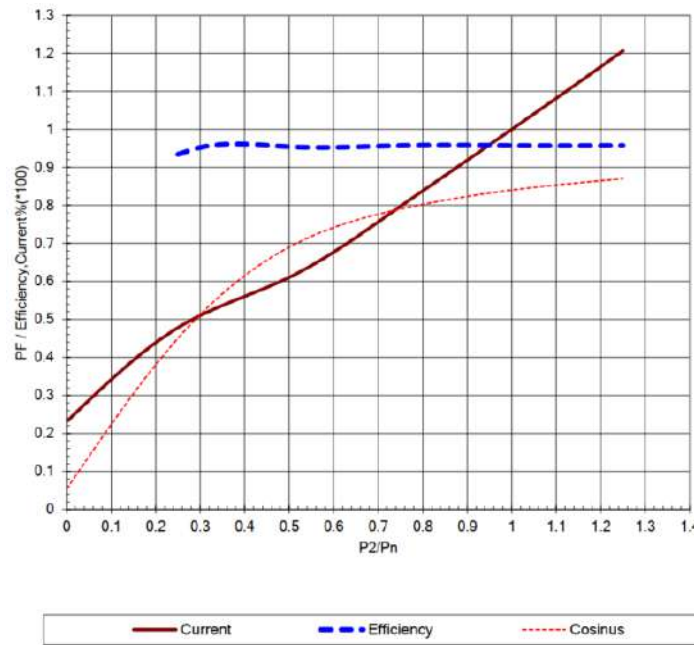


Figura 8.8: Load characteristics IEC LV motors ABB [6].

8.3.4. Caso 1: Compra de motores originales de eficiencia IE2 93,5 %

Considerando los antecedentes propuestos en la sección anterior, teniendo en cuenta 2 rebobinados por motor y una reducción de 4 puntos de la eficiencia nominal por cada uno, se tiene una eficiencia de 85,5 %. Se realizaron mediciones en dos motores de estas celdas, uno operando con 71 [A] y el otro con 61 [A] por fase. La corriente nominal según la placa es de 108 [A], lo que se traduce en un 66 % y un 56 %, respectivamente. La figura 8.8 presenta la curva característica del motor ABB, al ingresar con un 66 % de la corriente se obtiene una potencia del 58 % de la nominal y un factor de potencia igual a 0,73.

Por lo tanto, para efectos de estudio se analizarán dos casos: El primero con carga nominal y otro con una carga del 60 % de la nominal. En ambos casos se utiliza una eficiencia actual de 85,5 %. Así, cada motor consume mensualmente:

$$E_{motor,W1000} = \frac{75hp \cdot 0,746kW/hp \cdot horas_{mes} \cdot OT}{\eta} \tag{8.20}$$

Considerando 720 [horas] por mes y un OT del 97 %, la ecuación (8.23) queda:

$$E_{motor,100\%} = \frac{39075,5}{\eta} [kWh] \tag{8.21}$$

$$E_{motor,60\%} = \frac{23445,3}{\eta} [kWh] \tag{8.22}$$

La tabla 8.17 presenta el consumo eléctrico mensual por motor para cada caso de eficiencia y porcentaje de carga. Además, se incluye el ahorro energético ΔE en relación al consumo actual. En el caso de carga nominal se ahorran alrededor de 46.920 [kWh] al año, mientras que para el caso de operación al 60 % y que es más cercano a la realidad actual se ahorran 28.152 [kWh] de forma anual.

Casos	$\eta = 85.5\%$	$\eta = 93.5\%$	ΔE
Carga nominal	45.702	41.792	3.910
Carga 60 % nominal	27.421	25.075	2.346

Tabla 8.17: Consumos mensuales en [kWh] de ambos casos.

8.3.4.a. Impacto en el desempeño energético de Flotación

Al utilizar motores de eficiencia IE2 se alcanza un rendimiento de 93,5 %, mientras que en el caso actual, debido a los rebobinados realizados, la eficiencia se reduce a 85,5 %. Esta diferencia impacta directamente en el consumo energético de las celdas de flotación. La tabla 8.17 presenta los valores de ahorro energético obtenidos al operar con motores IE2 en condiciones nominales, lo que representa un ahorro de aproximadamente 3.910 [kWh] mensuales por motor. Considerando los 10 motores instalados en las celdas de flotación, el beneficio acumulado es significativo y se traduce en una reducción del Índice de Desempeño Energético (IDE) de flotación, tal como se observa en la figura 8.9.

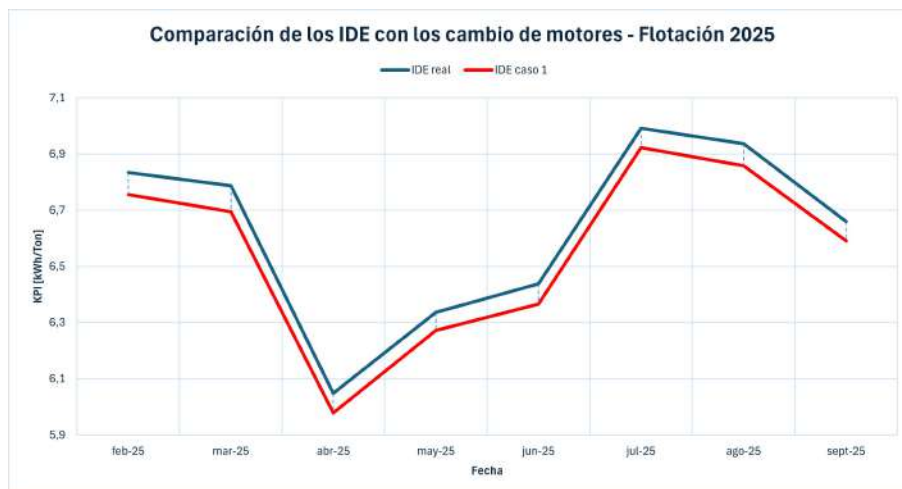


Figura 8.9: Reducción del IDE de flotación por el cambio a motores de eficiencia IE4 caso 1.

La tabla 8.18 muestra en detalle la comparación entre el caso actual y el escenario con motores IE2. Se aprecia que, para cada mes analizado, el IDE disminuye en torno al 1%–1,8%, evidenciando una mejora sostenida en la eficiencia energética del proceso. Aunque los porcentajes de variación puedan parecer modestos, su efecto acumulado en el consumo eléctrico mensual y anual es relevante, especialmente considerando la magnitud de la operación y el número de motores involucrados.

Fecha	Actual	Caso 1	
	IDE	IDE	Variacion
ene-25	4,0	3,92	-1,8 %
feb-25	6,8	6,76	-1,2 %
mar-25	6,8	6,69	-1,4 %
abr-25	6,0	5,98	-1,2 %
may-25	6,3	6,27	-1,0 %
jun-25	6,4	6,37	-1,1 %
jul-25	7,0	6,92	-1,0 %
ago-25	6,9	6,86	-1,1 %
sept-25	6,7	6,59	-1,0 %

Tabla 8.18: Comparación de la mejora con el caso actual.

8.3.5. Caso 2: Cambio de motores a eficiencia IE4 95,7 %

Al igual que en la sección anterior se analizarán dos casos: El primero con carga nominal y otro con una carga del 60% de la nominal. En ambos casos se utiliza una eficiencia actual de 85,5%. Así, cada motor consume mensualmente:

$$E_{motor, W1000} = \frac{75hp \cdot 0,746kW/hp \cdot horas_{mes} \cdot OT}{\eta} \quad (8.23)$$

Considerando 720 [horas] por mes y un OT del 97%, la ecuación 8.23 depende del valor de la eficiencia η . En la tabla 8.19 se presentan la comparación entre los consumos actuales y al utilizar el motor de eficiencia IE4. Se observa que en el caso de una operación con carga nominal se alcanza un ahorro energético ΔE de 4.871 [kWh], mientras que para el segundo caso se ahorran alrededor de 2.923 [kWh] operando a un 60% de la carga nominal. Esto se traduce en un ahorro anual de 58.452 [kWh] y 35.076 [kWh], respectivamente.

Casos	$\eta = 85.5\%$	$\eta = 95.7\%$	ΔE
Carga nominal	45.702	40.831	4.871
Carga 60% nominal	27.421	24.499	2.923

Tabla 8.19: Consumos mensuales en [kWh] de ambos casos.

8.3.5.a. Impacto en el desempeño energético de Flotación

La incorporación de motores de eficiencia IE4 en las celdas de flotación genera un impacto aún más significativo en el desempeño energético del proceso. En comparación con los motores rebobinados actualmente en operación, cuya eficiencia se encuentra reducida,

los motores IE4 permiten alcanzar un nivel superior de rendimiento, lo que se traduce en menores pérdidas eléctricas y un consumo más eficiente de la energía. Esto se cuantificó en la tabla 8.19 que a carga nominal se tiene un ahorro esperado de 4.871 [kWh] mensual por motor.

La figura 8.10 muestra la reducción del Índice de Desempeño Energético (IDE) de flotación al implementar esta tecnología en el caso 2, evidenciando una mejora sostenida en el tiempo. Complementariamente, la tabla 8.20 presenta la comparación mensual entre el escenario actual y el proyectado con motores IE4. Se observa una disminución del IDE que varía entre un 1,2% y 2,3%, dependiendo del mes analizado.

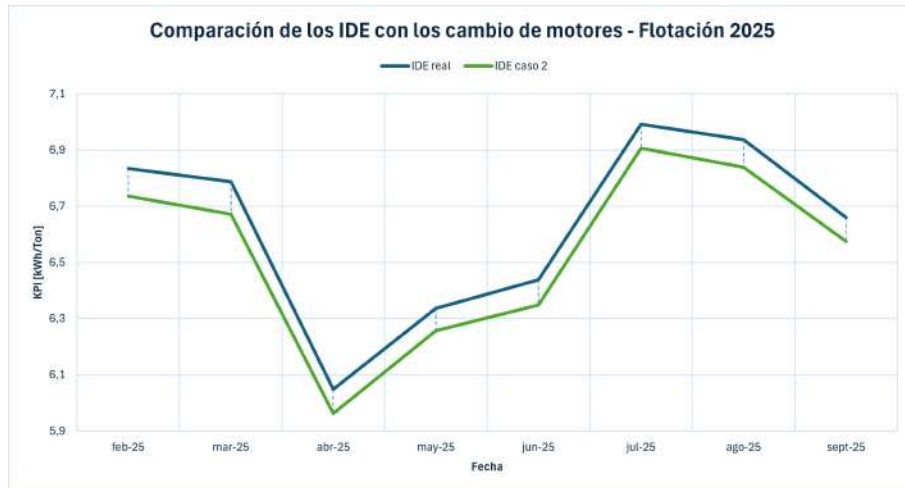


Figura 8.10: Reducción del IDE de flotación en el caso 2.

En la tabla 8.20 se presenta la comparación del caso 2 con el actual. Aunque los porcentajes de variación puedan parecer moderados, su efecto acumulado en el consumo eléctrico es considerable. Por ejemplo, en meses de mayor demanda energética, como julio y marzo, la reducción del IDE se aproxima al 2%, lo que representa un ahorro sustancial en términos de energía y costos operativos. Además, la consistencia de los resultados confirma que la mejora no depende de condiciones puntuales, sino que responde directamente a la mayor eficiencia intrínseca de los motores IE4.

Fecha	Actual	Caso 2	
	IDE_{actual}	IDE_{mejora}	Variación
ene-25	4,0	3,93	-2,3 %
feb-25	6,8	6,74	-1,4 %
mar-25	6,8	6,67	-1,7 %
abr-25	6,0	5,96	-1,4 %
may-25	6,3	6,26	-1,3 %
jun-25	6,4	6,35	-1,4 %
jul-25	7,0	6,91	-1,2 %
ago-25	6,9	6,84	-1,4 %
sept-25	6,7	6,57	-1,3 %

Tabla 8.20: Comparación de la mejora del caso 2 con el caso actual.

8.3.6. Evaluación económica de las propuestas

A partir de los antecedentes técnicos y energéticos presentados, se realizó la evaluación económica de las tres alternativas propuestas: el reemplazo por motores de eficiencia IE2, por motores de eficiencia IE4, y la opción de motores IE4 marca Toshiba. En la Tabla 8.21 se resumen los principales resultados obtenidos.

Parámetro	IE2 Reliance	IE4 Reliance	IE4 Toshiba
Eficiencia nominal	93,5 %	95,7 %	95,7 %
Eficiencia actual (rebobinados)	85,5 %	85,5 %	85,5 %
Energía anual por motor [kWh]	501.503	489.975	489.975
Costo anual por motor [USD]	49.359	44.098	44.098
Ahorro energético anual [kWh]	46.925	58.453	58.453
Ahorro anual por motor [USD]	4.223	5.261	5.261
Inversión inicial [USD]	11.300	14.835	6.722
Periodo de recuperación [años]	2,68	2,82	1,28

Tabla 8.21: Resultados de la evaluación económica de alternativas de motores para celdas Wenco 1000.

Se consideró una vida útil de 20 años para los nuevos motores, aplicando una depreciación lineal según la ecuación:

$$D = \frac{C_{inicial} - V_{residual}}{n} \quad (8.24)$$

donde $C_{inicial}$ es la inversión inicial, $V_{residual}$ se considera nulo y $n = 20$ años. De esta forma, la depreciación anual equivale a un 5 % del costo de inversión, reflejando la pérdida contable de valor del activo.

El flujo de caja se compone de los ahorros anuales por reducción de consumo energético menos la depreciación contable no desembolsable, considerando una tasa de descuento o TIE de 10 %. Los resultados del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se presentan en la Tabla 8.22.

Indicador	IE2 Reliance	IE4 Reliance	IE4 Toshiba
Ahorro anual [USD]	4.223	5.261	5.261
VAN (10 %) [USD]	22.200	25.900	36.600
TIR [%]	32,4	28,5	54,7
Payback descontado [años]	3,0	3,1	1,6

Tabla 8.22: Indicadores económicos considerando depreciación lineal y TIE = 10 %.

Los resultados muestran que todas las alternativas presentan un Valor Actual Neto positivo y una TIR superior al 10 %, por lo tanto, son económicamente viables. Entre ellas, la alternativa con motores IE4 Toshiba destaca por presentar el menor costo de inversión, un periodo de recuperación de 1,6 años y una TIR del 54,7 %. Esto se debe principalmente a su menor costo unitario y al mismo nivel de eficiencia que los motores IE4 estándar.

Por otro lado, las opciones IE2 e IE4 estándar también resultan atractivas, con periodos de recuperación cercanos a los tres años y TIR superiores al 25 %, lo que demuestra que incluso bajo escenarios conservadores de operación y con depreciación a 20 años, la inversión se mantiene favorable.

La incorporación de motores de alta eficiencia no solo reduce los costos operacionales, sino que también contribuye al cumplimiento de los objetivos de desempeño energético establecidos para el área de flotación, asegurando una operación más confiable y sostenible en el largo plazo.

8.4. Gestionar el consumo en Flotación mediante el uso de los medidores en línea

8.4.1. Objetivo

Revisar los consumos eléctricos registrados en la distribución de los estados de pago para contrastar las mediciones de los nuevos medidores digitales. Se busca aprovechar los datos levantados por los medidores de energía instalados en los CCM de las celdas de flotación.

8.4.2. Descripción general

Analizar los registros de consumo obtenidos desde los medidores digitales y análogos para identificar los puntos críticos o diferencias entre las lecturas. Con base en este diagnóstico, generar un plan de acción en caso de que fuese necesario.

8.4.3. Antecedentes

En el capítulo del contexto energético se observó que el consumo eléctrico de flotación representa un 19 % del consumo total de la operación, lo que la convierte en un área de uso significativo de la energía. En 2024, las celdas de flotación representaron un 33 % del consumo de flotación, las bombas de relave final un 23 %, el molino de remolienda un 11 % y flotación arenas un 32 %.

Se hizo una revisión en el desempeño energético del proceso Flotación, la cual presentó variaciones en el Indicador de Desempeño Energético (IDE) respecto al consumo que entregó el modelo matemático generado en ese capítulo. Se observó que el consumo real de flotación, en promedio, fue un 19,8 % más que lo entregado por el modelo en el 2024 y un 44,6 % más en el 2025. Estas variaciones significan un mayor gasto energético respecto a la cantidad de material procesado.

Como indicador complementario, se revisó la planilla de distribución de consumos eléctricos correspondientes al periodo enero-septiembre de los años 2024 y 2025, con el objetivo de comparar el comportamiento energético acumulado hasta la fecha de elaboración de esta memoria.

Durante el periodo enero-septiembre de 2024, el área de flotación registró un consumo total de 24.896.973 [kWh], de los cuales 8.411.245 [kWh] corresponden específicamente a las celdas de flotación. En el mismo intervalo de 2025, el consumo en flotación ascendió a

30.376.923 [kWh], mientras que el consumo en celdas alcanzó los 13.634.476 [kWh].

Este incremento se traduce en un aumento del 22 % en el consumo total del proceso de flotación, impulsado principalmente por un crecimiento del 62,1 % en el consumo eléctrico de las celdas de flotación. Parte de esta revisión busca analizar la razón de este aumento.

En la figura 8.11 se presenta un gráfico con la tendencia del consumo en los centros de costo del área de flotación durante el año 2024 y lo que va de 2025. Se observa que el consumo eléctrico en las celdas de flotación se incrementa considerablemente desde el mes de febrero de 2025.

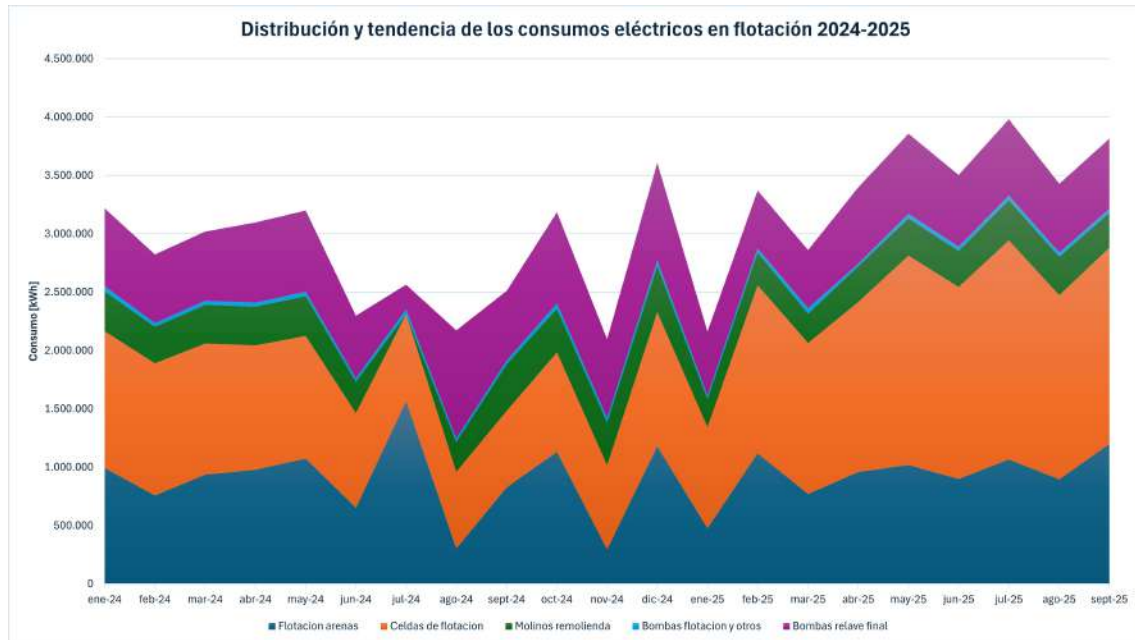


Figura 8.11: Tendencia del consumo eléctrico en flotación entre los años 2024 y septiembre 2025

8.4.4. Revisión de los medidores de energía

Debido al incremento en el consumo de las celdas de flotación, se solicitó la planilla de distribución de los medidores individuales al equipo de mantención eléctrica planta. En la tabla 8.23 se muestran los equipos a los cuales está asociado cada medidor.

Medidor	Equipos
CCM 16	5 x Wenco 1000
CCM 17	5 x Wenco 1000
CD F2	Celda 4500
CCM 310	Fila A Wenco 1500
CCM 311	Fila B Wenco 1500
CCM 314	Wenco 3000
CCM 410	Fila C Wenco 1500 1,2,11,12
CCM Rougher 1	Fila C Wenco 1500 3,4,5,6
CCM Rougher 2	Fila C Wenco 1500 7,8,9,10
CCM 12	Bajo consumo
Celdas Denver	OFF

Tabla 8.23: Identificación de los equipos tomados por los distintos CCM de las celdas de flotación.

Con los medidores identificados se realizó una revisión del registro de los consumos eléctricos desde el año 2024. Identificando que el medidor del CCM Rougher 2 correspondiente a cuatro celdas de flotación Rougher fila C presenta un incremento significativo en su lectura desde enero de 2025, pasando de un consumo de 123.000 [kWh] en diciembre de 2024 a 399.480 [kWh] en enero del 2025. Este aumento se mantuvo en ascenso durante los meses posteriores, alcanzando un valor de 1.045.920 [kWh] en septiembre de 2025. La figura 8.12 presenta la tendencia de los consumos por cada uno de los medidores.

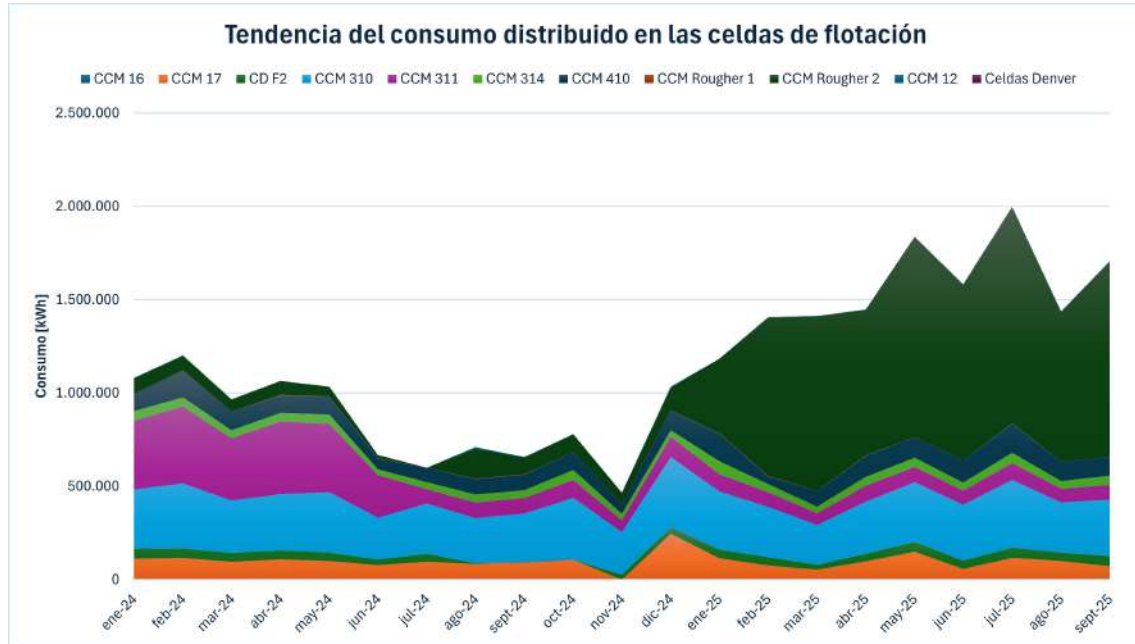


Figura 8.12: Tendencia del consumo eléctrico en los CCM ubicados en las celdas de flotación durante los años 2024 y 2025.

Esta tendencia anómala se complementa con lo observado en la figura 8.13, donde se compara la lectura del medidor análogo con la del medidor digital implementado en julio de este año, evidenciando una diferencia de orden diez entre ambos registros.

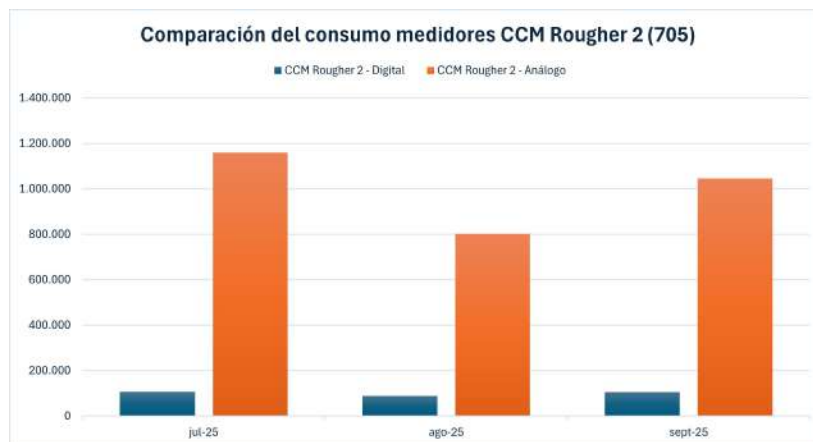


Figura 8.13: Comparación lectura medidores análogo y digital en el CCM Rougher 2.

8.4.5. Plan de acción

Hasta la fecha de noviembre de 2025 se siguen utilizando los medidores análogos para registrar el consumo eléctrico de la operación. La lectura de estos equipos se realiza de manera manual la cual puede traer errores de arrastre. Es por esto que se sugiere el cambio a los equipos digitales que se encuentran instalados desde julio del presente año. Para visualizar esta modificación en el consumo de las celdas de flotación se genera el gráfico de la figura 8.14 donde se reemplaza la medición del equipo análogo por el digital en los meses de julio, agosto y septiembre.

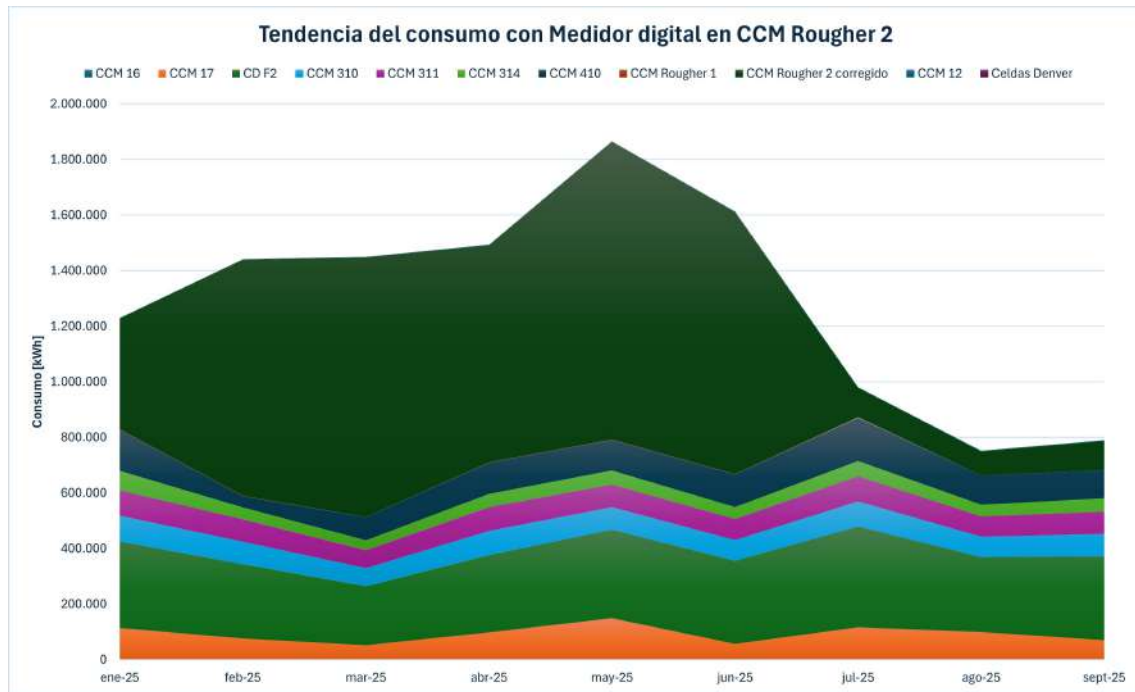


Figura 8.14: Consumo eléctrico corrigiendo la lectura del medidor ubicado en CCM Rougher 2.

Se observa que el consumo se reduce considerablemente, la tabla 8.24 muestra la disminución del consumo eléctrico en las celdas de flotación al integrar el medidor digital en el CCM Rougher 2. Para el ahorro económico se considera que el costo por kWh que le cobra Enel a AngloAmerican es de 0,09 [USD/kWh].

Ahorro energético	jul-25	ago-25	sept-25
ΔE	1.053.346	714.942	941.516
USD	\$ 94.801	\$ 64.345	\$ 84.736

Tabla 8.24: Diferencia en los consumos y centros de costo al utilizar medidor digital en Rougher 2.

Si bien la acción inmediata adoptada fue corregir el dígito adicional presente en el medidor alterado, también se identificaron otros errores de medición en las celdas de flotación. Para evaluar el efecto del reemplazo de medidores análogos por digitales, se utilizaron los datos registrados a partir de julio de 2025, tal como se muestra en la figura 8.15. A diferencia de lo observado en la figura 8.14, donde se apreciaba una disminución del consumo eléctrico a nivel del subproceso de celdas de flotación, esta aparente reducción se compensa al incorporar los medidores digitales, puesto que estos entregan lecturas significativamente mayores que las obtenidas con los dispositivos análogos.

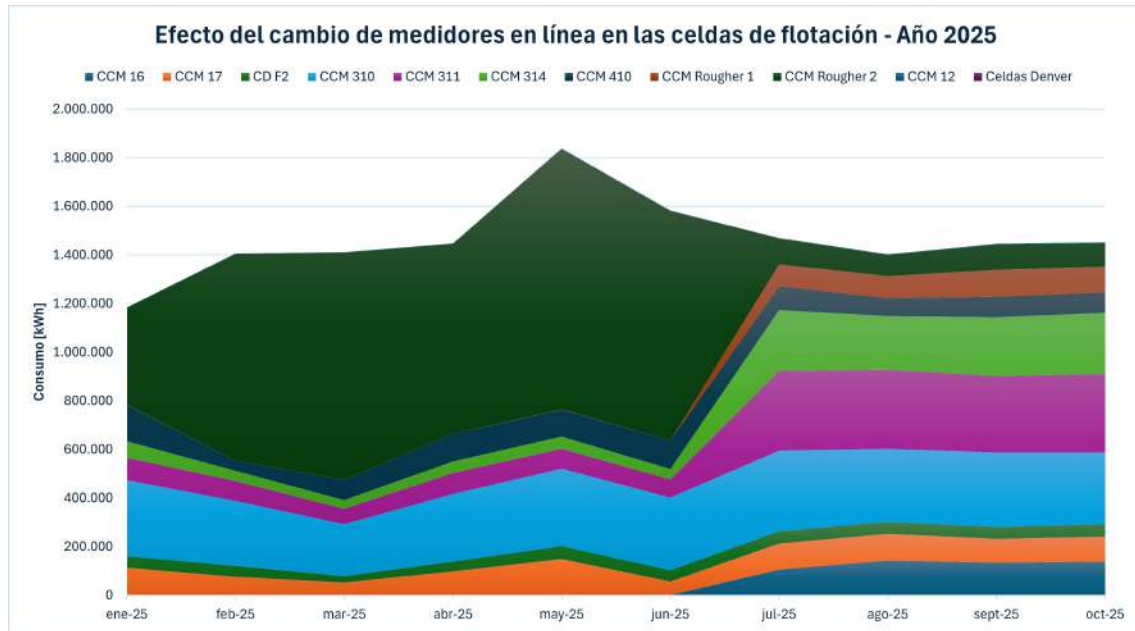


Figura 8.15: Consumo eléctrico utilizando los medidores digitales desde julio 2025.

La incorporación de los medidores digitales compensa parcialmente el error asociado al medidor del CCM Rougher 2 que había sido alterado. No obstante, persiste una diferencia en el consumo atribuido a las celdas de flotación cuando se contrasta con la distribución de consumos reportada como data oficial. Esta discrepancia se evidencia en la tabla 8.25, donde se observa que su magnitud no es despreciable, alcanzando un costo de 55.916 USD durante el mes de julio.

Ahorro energético	jul-25	ago-25	sept-25
ΔE	621.285	229.893	465.813
USD	\$ 55.916	\$ 20.690	\$ 41.923

Tabla 8.25: Diferencia en los consumos y centros de costo al utilizar los medidores digitales.

8.4.6. Efecto en el desempeño energético reportado por el SGE

Esto no solo tiene un efecto económico sino que afecta directamente al reporte ante el ministerio de energía. Una parte del sistema de gestión de la energía toma un punto de la norma ISO 50001:2018 [1] donde se hace relación al monitoreo y control del desempeño energético de las áreas de uso significativo. Durante el año 2024, se fijaron metas a nivel organizacional, donde una de ellas se fijó en una variación de $\pm 10\%$ respecto a una meta de 6 [kWh/ton]. Actualmente esa meta no se está cumpliendo dado que en julio se alcanzó una variación del 16,5 %, en agosto de 15,6 % y en septiembre 11 %. En la figura 8.16 se presenta el gráfico de los IDE para los 3 casos: Utilizando los medidores análogos, corrigiendo el medidor Rougher 2, usando los medidores digitales.

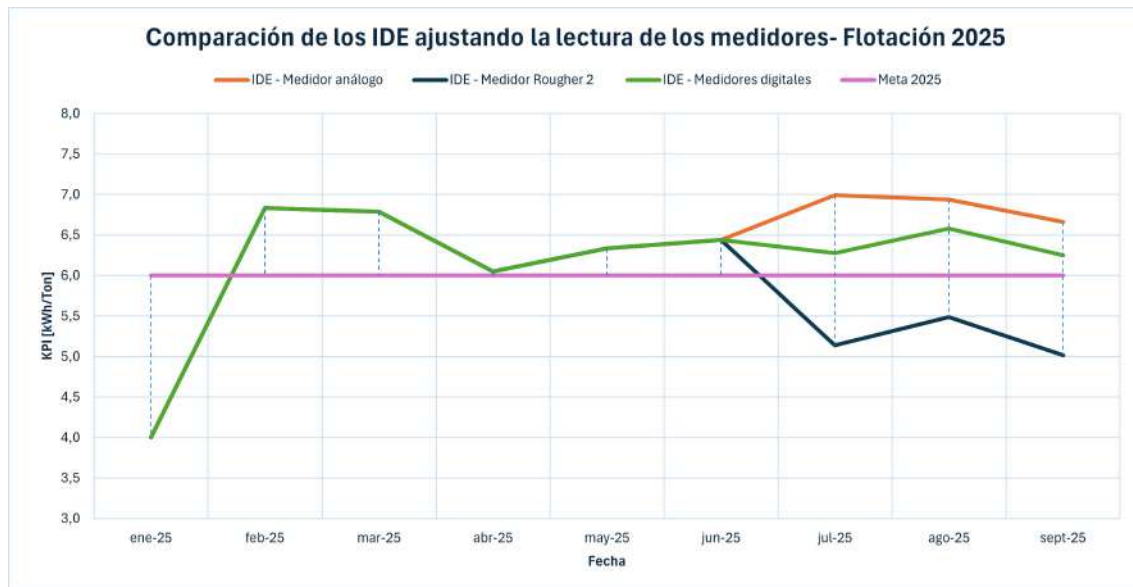


Figura 8.16: Comparación del indicador de desempeño energético corrigiendo la lectura de los medidores.

En la tabla 8.26 se presentan los valores de la variación porcentual respecto a la meta fijada para el año 2025. Al corregir el medidor del Rougher 2, se aprecia una mejora significativa en la reducción del indicador, alcanzándose valores mejores que la meta durante los meses de julio y septiembre. Por su parte, la integración de los medidores digitales no solo permite una medición más precisa de los consumos eléctricos, sino que además se traduce en un IDE que se mantiene dentro de los márgenes establecidos por la meta operacional del presente año. Por lo tanto, la inclusión de los medidores en línea permite obtener un ahorro energético y económico, elimina una causa de error en las variaciones del IDE y asegura un reporte adecuado ante la autoridad.

Variación	IDE actual	IDE Rougher 2	IDE digitales
jul-25	16,5 %	-14,3 %	4,6 %
ago-25	15,6 %	-8,5 %	9,7 %
sept-25	11,0 %	-16,4 %	4,2 %

Tabla 8.26: Variación respecto a la meta del indicador de desempeño energético de flotación en los 3 casos.

8.5. Otras oportunidades de mejora en eficiencia energética

8.5.1. Corregir estados de operación en Molienda Convencional

8.5.1.a. Objetivo

Mejorar el desempeño energético del proceso de molienda mediante la reducción del consumo eléctrico específico o el aumento del volumen de material procesado. Además, se busca disminuir la frecuencia de arranques y detenciones de los equipos, promoviendo una operación más continua, eficiente y sostenible.

8.5.1.b. Propuesta de mejora

Se plantea establecer un modo de operación con un control especializado que reduzca los arranques y detenciones en la molienda convencional. El objetivo es mantener un funcionamiento más estable, disminuir las variaciones en el consumo de energía y evitar esfuerzos mecánicos innecesarios. Para ello, se indica que la planta opere con la sección 1 o la sección 2, usando solo una de ellas, y que ambas trabajen al mismo tiempo solo cuando sea indispensable por la producción o condiciones específicas de la operación.

Otra propuesta considera detener de forma temporal la sección 1 o la 2 como medida frente a la baja carga. La sección que quede activa recibirá tanto su carga normal como la de la unidad detenida, aprovechando mejor su capacidad. Al mismo tiempo, se mantendrá una sección en estado de reserva, lo que permitirá manejar la carga con flexibilidad y asegurar respaldo en caso de fallas o necesidades de mantenimiento, logrando una operación más estable, eficiente y segura.

8.5.2. Definición del tiempo crítico de operación en vacío del Molino SAG

8.5.2.a. Objetivo

Mejorar el desempeño energético de la molienda SAG mediante la gestión eficiente de sus estados de operación, priorizando la operación en vacío como estrategia de disponibilidad rápida, con un umbral de tiempo crítico que equilibre eficiencia y costos.

8.5.2.b. Propuesta de mejora

Se propone una estrategia basada en la gestión eficiente de sus estados de operación: con carga, vacío y apagado. Esta optimización contempla definir condiciones operativas que permitan una rápida disponibilidad del equipo, reduciendo los tiempos de arranque mediante la operación en vacío cuando sea técnicamente viable. Esta modalidad busca mantener el molino en estado activo sin carga, facilitando una transición más ágil hacia la operación plena. No obstante, se debe considerar el impacto económico asociado a esta práctica, evaluando los costos energéticos y de desgaste frente a los beneficios operacionales, con el fin de establecer un equilibrio que favorezca la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Adicional a esto, se busca establecer un umbral de tiempo que defina un período crítico durante el cual los motores pueden operar en condición de vacío sin comprometer la eficiencia del proceso ni generar pérdidas operacionales significativas.

Complementariamente, se destaca que un motor síncrono en vacío, operando en estado sobreexcitado, constituye un aporte de potencia reactiva inductiva al sistema eléctrico. Este comportamiento contribuye a mantener el factor de potencia de la planta dentro de los rangos normativos, incluso cuando el motor no se encuentra con carga mecánica. En contraste, si el motor permanece apagado, dicho aporte desaparece y el factor de potencia puede deteriorarse, generando posibles penalizaciones económicas y afectando la estabilidad operativa. Por lo tanto, la estrategia de gestión de estados no solo debe considerar la eficiencia energética y los costos asociados, sino también el rol de los motores síncronos como elementos de soporte al factor de potencia y a la calidad de la energía en la instalación.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1. Conclusiones

En el presente trabajo se evaluó el desempeño energético de las áreas de Uso Significativo de Energía (USEs) en la planta concentradora El Soldado, abordando tanto el levantamiento de consumos como la gestión operativa y la calidad de la energía. A partir de los objetivos planteados, se desarrollaron análisis detallados que permitieron identificar ineficiencias, cuantificar brechas respecto a modelos de referencia y proponer soluciones técnicas y económicas orientadas a la mejora continua.

En primer lugar, el levantamiento de consumos energéticos permitió caracterizar de manera precisa la distribución de la energía eléctrica en los procesos de molienda SAG, molienda convencional, flotación y tranque de relaves. Se constató que la molienda SAG concentra cerca del 43 % del consumo eléctrico total, seguida por la molienda convencional y flotación, que en conjunto representan más del 78 %. Este diagnóstico inicial fue fundamental para focalizar el estudio en las áreas de mayor impacto, cumpliendo con el primer objetivo específico y estableciendo una base sólida para la evaluación posterior.

En segundo término, la implementación de medidores en línea permitió gestionar el consumo energético en molienda y flotación con datos trazables y auditables. En la sección 1 de molienda convencional se evidenció una alta frecuencia de arranques y detenciones (más de 30 por mes), lo que redujo el tiempo operativo efectivo a valores cercanos al 65 %, muy por debajo de la línea base de 2023 (90 %). En el molino SAG, en cambio, se observó una operación continua con carga en el 95 % del tiempo, lo que confirma su relevancia como proceso crítico y eficiente. Estos resultados muestran cómo el monitoreo digital permite identificar patrones de operación y proponer ajustes que reduzcan pérdidas energéticas y esfuerzos mecánicos innecesarios.

Respecto a la calidad de la energía, el análisis de distorsión armónica y factor de potencia reveló incumplimientos relevantes en baja tensión, especialmente en los centros de distribución CD 300 y CD 302, donde el THDi superó ampliamente el 8 % permitido por la norma IEEE 519-2022 [1]. Asimismo, se detectaron factores de potencia promedio inferiores a los límites exigidos por la normativa chilena, lo que afecta la eficiencia global del sistema. Estos hallazgos justifican la integración de filtros activos y sistemas de compensación, cumpliendo con el tercer objetivo específico y aportando evidencia técnica para la toma de decisiones.

En cuanto al desempeño energético, tanto en molienda como en flotación se observaron desviaciones significativas del indicador de referencia. En la molienda 2, el IDE real superó al proyectado en todos los meses de 2025, con variaciones de hasta un 43,5 %. En flotación, las diferencias alcanzaron un 38,3 % en diciembre de 2024 y un 53,9 % en febrero de 2025, confirmando una ineficiencia sostenida. Estos resultados cumplen con el cuarto objetivo específico, al identificar oportunidades concretas para reducir el consumo específico de energía y mejorar la eficiencia de los procesos.

Las propuestas de solución desarrolladas permiten abordar estas brechas desde distintas perspectivas. La primera, la integración de filtros armónicos en CD 300 y CD 302, mostró ser técnica y económicamente viable, reduciendo el THDi a valores normativos, mejorando el factor de potencia y generando ahorros energéticos y económicos con VAN positivo y periodos de recuperación inferiores a cinco años. La segunda, la compensación de reactivos en CD 300, si bien presenta un VAN negativo bajo criterios estrictamente energéticos, asegura cumplimiento normativo y estabilidad operativa, constituyendo una medida de confiabilidad más que de rentabilidad. La tercera, el reemplazo de motores en las celdas Wenco 1000 por unidades de alta eficiencia, destacó por su impacto económico positivo, especialmente la alternativa IE4 Toshiba, con un periodo de recuperación de 1,6 años y una TIR de 54,7 %. Finalmente, la cuarta propuesta, basada en la gestión del consumo mediante medidores digitales, permitió corregir errores de medición, asegurar trazabilidad y mantener el indicador de desempeño energético dentro de los márgenes establecidos por la norma ISO 50001:2018 [1], reforzando la importancia de la digitalización en la gestión energética.

Además de estas propuestas principales, se identificaron oportunidades adicionales de mejora operativa, como la reducción de arranques y detenciones en la molienda convencional mediante un control especializado, y la definición de un tiempo crítico de operación en vacío para el molino SAG. Estas medidas, de carácter organizacional, no requieren grandes inversiones, pero sí un cambio en la gestión operativa que puede generar beneficios energéticos y de confiabilidad en el largo plazo.

En síntesis, el estudio permitió cumplir con el objetivo general de evaluar y proponer mejoras en el desempeño energético de las áreas de Uso Significativo de Energía en El Soldado. Los resultados obtenidos no solo confirman la existencia de ineficiencias y oportunidades de mejora, sino que también demuestran la viabilidad técnica y económica de las soluciones propuestas. Asimismo, se abren nuevas líneas de análisis, como la optimización de la operación en vacío del SAG y la gestión flexible de las secciones de molienda, que pueden ser desarrolladas en futuros trabajos. De esta manera, la memoria contribuye a la mejora continua del desempeño energético de la planta, asegurando sostenibilidad, cumplimiento normativo y competitividad en el contexto de la industria minera.

Apéndice A

Cotizaciones

A.1. Filtros armónicos

A.1.1. Anexo: Cotización de filtros activos y batería de condensadores

La Tabla A.1 presenta la cotización enviada por el proveedor para la implementación de filtros activos PCS+ y una batería de condensadores VarSet Premium, ambos destinados a mejorar la calidad de energía en baja tensión. Los valores corresponden a precios netos en CLP, según correo recibido en noviembre de 2025.

Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario
1	Filtro activo Premium PCS+ 300 A, 380–480 V, IP54	1	\$47.230.494 CLP
2	Batería de condensadores VarSet Premium 550 kVar con inductancias e interruptor	1	\$33.784.557 CLP
3	Filtro activo PCS+ 300 A, 380–480 V, IP54	1	USD 37.000

Tabla A.1: Cotización de equipos para compensación de reactivos y filtrado de armónicos.

Los equipos cotizados permiten abordar simultáneamente la corrección del factor de potencia y la mitigación de distorsión armónica en los centros de distribución CD 300 y CD 302. El filtro activo PCS+ está diseñado para operar en redes con alta presencia de cargas no lineales, mientras que la batería VarSet Premium incorpora inductancias de rechazo para evitar resonancias y asegurar una compensación estable. Se recomienda evaluar técnicamente la integración de ambos sistemas en función del perfil de carga y los niveles de THDi registrados.

A.2. Motores celdas de flotación

A.2.1. Cotización motores BALDOR-RELIANCE

La Tabla A.2 resume la cotización enviada por el proveedor FERAM para motores de flotación de 75 y 100 HP, indicando eficiencia y precio unitario.

Motor	Eficiencia	Condición	Precio [USD]
75 HP original	93,5 %	Motor BALDOR-Reliance	11.300
100 HP original	93,0 %	Motor BALDOR-Reliance	20.500
75 HP IE3	94,6 %	4 polos BALDOR-Reliance	13.050
100 HP IE3	93,1 %	8 polos BALDOR-Reliance	26.560
75 HP IE4	95,7 %	4 polos BALDOR-Reliance	14.835,99
100 HP IE4	94,2 %	8 polos BALDOR-Reliance (frame 447T)	31.750

Tabla A.2: Cotización de motores BALDOR-Reliance para celdas de flotación (FERAM, 2025).

A.2.2. Cotización motores TOSHIBA

La figura A.1 muestra la cotización realizada por el proveedor Flopower para la compra de motores de eficiencia IE4.

DESCRIPCION	ITEM 1	ITEM 2
Numero Parte	0754SDSR41A-P	CUSTOM
Fabricante	TOSHIBA	TOSHIBA
Encerramiento	TEFC	TEFC
Potencia (HP/kW)	75HP	75HP
Velocidad (Rpm)	1500	1500
Tensión (V)	190/380	190/380
Frecuencia (Hz)	50	50
Carcasa/Frame	365T	405T
índice De Protección	IP55	IP56
Cantidad	10	10
Valor Unitario (USD)	\$ 6.224,00	\$ 9.549,00
Valor Total (USD)	\$62.240,00	\$95.490,00

Figura A.1: Cotización enviado por Flopower.

Bibliografía

- [1] I. O. for Standardization, “Iso 50001:2018 – energy management systems – requirements with guidance for use,” 2018, disponible en: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
- [2] A. to Save Energy, “Guía de implementación de sistemas de gestión de energía basados en iso 50001:2018,” 2022, disponible en: <https://agenciase.org/2022/12/06/agenciase-publica-nueva-guia-de-implementacion-de-sistemas-de-gestion-de-la-energia-basados-en-iso-500012018/>.
- [3] C. A. S. Muñoz, “Estudio de la distorsión armónica en una planta minera, sus causas y mitigaciones,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago de Chile, 2008.
- [4] N. V. A., J. Sánchez, and G. Vergara, “Informe anual proceso de revisión energética año 2024,” Anglo American, Informe técnico, jan 2025, operación El Soldado. Sistema de Gestión de Energía bajo norma ISO 50.001:2018. Revisión 0.
- [5] P. Ingeniería, “Diagrama unilineal general,” May 2022, plano 5330-EE-0213, Documento interno.
- [6] ABB, “Load curve report – 75 hp, 4-pole motor,” ABB Motors, Informe técnico, oct 2025, tEFC, 3-phase squirrel cage induction motor. Based on IEC 60034-2-1:2014. Data as of 28/09/2023. Rated efficiency: 95.7%. Power factor: 0.84.
- [7] I. of Electrical and E. Engineers, “Ieee std 519-2019: Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems,” 2019, disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8766229>.
- [8] M. de Energía, “Ley n° 21.305 sobre eficiencia energética,” Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, consultado en noviembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1158858>
- [9] J. D. Arcila, “Armónicos en sistemas eléctricos,” https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf, n.d.
- [10] S. Martínez, “Evaluación financiera de proyectos,” *Revista de Economía UNAM*, vol. 6, no. 1, pp. 23–40, ene 2009.
- [11] I. E. Commission, “Iec 62053-22: Electricity metering equipment (a.c.)—particular requirements—static meters for active energy (classes 0.2s and 0.5s),” 2003, norma internacional.

- [12] —, “Iec 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (emc)—part 4-30: Testing and measurement techniques—power quality measurement methods,” 2015, norma internacional, Clase A.
- [13] —, “Iec 62586-2: Power quality measurement in power supply systems—part 2: Functional tests and uncertainty requirements,” 2017, norma internacional.
- [14] —, “Iec 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use—part 1: General requirements,” 2010, norma internacional.
- [15] E. C. for Electrotechnical Standardization, “En 61326-1: Electrical equipment for measurement, control and laboratory use—emc requirements—part 1: General requirements,” 2013, norma europea.
- [16] —, “En 61000-3-3: Electromagnetic compatibility (emc)—part 3-3: Limits—limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker,” 2013, norma europea.
- [17] O. Spa and N. Valenzuela, “Metodología y criterios de revisión energética, indicadores de desempeño energético (ides) & línea de base energética (lbe),” Anglo American, Informe técnico, 2025, documento vigente. Revisado por Claudio Goich, Marcelo Sanhueza y Nicolás Valenzuela. Aprobado por Daniel González.
- [18] C. N. de Energía, “Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución,” <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/NTCSDx2024-1.pdf>, Gobierno de Chile, 2024, santiago de Chile, Abril 2024.
- [19] R. Leiva, “¿dónde medir para calcular el filtro activo?” Presentación en formato PPT, Circuitos S.A., 2025, material técnico interno.
- [20] F. Corporation. (2025) 13 causas comunes del fallo del motor. Accedido: Septiembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/motor-es-accionamientos-bombas-compresores/13-causas-comunes-del-fallo-del-motor>
- [21] A. AG, *EU MEPS – Requisitos de eficiencia para motores de baja tensión*, Folleto técnico, 2014, la afirmación sobre la reducción de eficiencia por rebobinado aparece en la p. 11. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/fb3d4c243f14b2db83257dd5003b7cd7/ABB_Motors_EU_MEPS_brochure_Spa.pdf
- [22] I. E. Commission, *Rotating Electrical Machines – Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*, IEC International Standard IEC 60034-2-1:2024, 2024, ratified by Asociación Española de Normalización as UNE-EN IEC 60034-2-1:2024 in June 2024. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/67756>
- [23] C. S.A., “Seminario técnico: Armónicos y soluciones en sistemas eléctricos,” Presentación en seminario realizado en Santiago, Chile, 2024, documento interno no publicado.
- [24] EASA and AEMT, “The effect of repair/rewinding on premium efficiency/ie3 motors,” Electrical Apparatus Service Association (EASA) and Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT), Tech. Rep., 2019. [Online]. Available:

<https://easa.com/resources/resource-library/the-effect-of-repairrewinding-on-premium-efficiencye3-motors>

- [25] I. E. Commission, *Power transformers — Part 1: General*, Std. IEC 60076-1, 2011, defines transformer ratings and test methods for no-load and load losses.
- [26] I. of Electrical and E. Engineers, *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, Std. IEEE Std C57.12.90, 2015, procedures for measuring no-load and load losses, temperature corrections, and performance tests.