

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor patrocinante:
Dr. Luis García Santander

Informe de Memoria de Título
Para optar por al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

**Análisis de calidad de energía y gestión
energética para recintos de Essbio**

Concepción, septiembre de 2025

Jimmy Arias Lara

Agradecimientos

Dedico este espacio para reconocer y agradecer a todas las personas que me han acompañado durante esta etapa.

En primer lugar, a mi madre, cuyo apoyo incondicional ha sido mi sustento durante todos estos años. A mi familia en general, por estar siempre presente. Sin su respaldo, no habría llegado hasta aquí.

Un especial agradecimiento a mis compañeros Benjamín, Matías, Joaquín y Gabriela, con quienes compartí gran parte de mi tiempo en la universidad. Su compañía y apoyo hicieron esta etapa mucho más llevadera y enriquecedora.

Asimismo, quiero destacar la invaluable contribución del profesor Luis García, cuyo patrocinio y observaciones en la memoria permitieron explorar áreas de investigación no previstas inicialmente. Su exigencia y orientación fueron fundamentales para mi crecimiento académico.

Finalmente, agradezco al equipo de procesos de Essbio, con quienes compartí durante la realización de esta investigación. Destaco su profesionalismo, amabilidad y disposición para resolver todas mis dudas. En particular, a mi supervisor Alberto Vera, cuyo apoyo constante desde mi práctica profesional hasta hoy ha sido invaluable, así como al resto de los profesionales de Essbio que me brindaron información y acompañamiento en visitas a plantas.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

Este trabajo analiza la calidad de la energía y propone estrategias de gestión energética en instalaciones de la empresa sanitaria Essbio, con énfasis en la corrección del factor de potencia (FP) debido a que anualmente se paga aproximadamente 160 millones de pesos solamente en multas por factor de potencia. Se identificó que un número significativo de recintos operan con un FP por debajo del mínimo exigido por la normativa chilena, lo que ha derivado en multas recurrentes y un uso ineficiente de la infraestructura eléctrica.

La metodología empleada consiste en la recopilación y análisis de datos de consumo eléctrico mediante facturación mensual y mediciones locales con analizadores de red, aplicando criterios de priorización a través de un polinomio que pondera variables como la magnitud y frecuencia de las multas, el nivel del FP, y la criticidad operativa de cada planta. Se seleccionan tres recintos para un estudio de caso detallado: PTAP La Mochita, Captación Sanchina 2, y PEAS Lomas de San Andrés 1. A partir de estos casos, se evalúan las condiciones operativas, deficiencias en la compensación de energía reactiva y oportunidades de mejora mediante, monitoreo y propuestas de mitigación.

Los resultados revelan que la principal causa de penalizaciones es la operación en condiciones de carga desfavorables, junto con una compensación insuficiente o mal dimensionada. Se propone un enfoque integral que combina monitoreo continuo, ajustes operacionales y dimensionamiento adecuado de equipos de compensación de potencia reactiva permitiendo mejorar el FP, reducir costos operacionales y cumplir con las exigencias normativas de eficiencia energética.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	CONTEXTO GENERAL	1
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.4	OBJETIVOS	4
1.4.1	<i>Objetivo general</i>	4
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.5	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	INTRODUCCIÓN	6
2.2	EXIGENCIAS REGULATORIAS DEL FACTOR DE POTENCIA	6
2.3	DISTORSIÓN ARMÓNICA	7
2.4	ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	8
3	METODOLOGÍA	10
3.1	INTRODUCCIÓN	10
3.2	METODOLOGÍA ACTUAL DE ESSBIO	10
3.3	INSTRUMENTACIÓN DISPONIBLE	11
3.4	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE RECINTOS	12
4	PROPUESTA DE ESTRATEGIA	16
4.1	INTRODUCCIÓN	16
4.2	PLAN DE ACCIÓN PARA REALIZAR ACCIONES CORRECTIVAS PARA EL FP	16
4.3	PLAN DE ACCIÓN PARA REALIZAR ACCIONES PREVENTIVAS PARA EL FP	18
5	HERRAMIENTA ANALÍTICA	21
5.1	INTRODUCCIÓN	21
5.2	BASE DE DATOS SERVICIOS ELÉCTRICOS	21
5.3	TABLERO DE LA FACTURACIÓN DE SERVICIOS ELÉCTRICOS	22
5.3.1	<i>Hoja 1: Análisis Comparativo de Consumos y Multas</i>	23
5.3.2	<i>Hoja 2: Mapa de Calor Georreferenciado</i>	25
6	CASO DE ESTUDIO	27
6.1	INTRODUCCIÓN	27
6.2	SELECCIÓN DE RECINTOS	27
6.3	DESCRIPCIÓN RECINTOS ESTUDIADOS	28
6.3.1	<i>Captación Sanchina</i>	29
6.3.2	<i>PEAS Lomas de San Andrés 1</i>	32
6.3.3	<i>PTAP La Mochita</i>	32
7	ANÁLISIS DE RECINTOS SELECCIONADOS	38
7.1	INTRODUCCIÓN	38
7.2	CONSUMOS ELÉCTRICOS FACTURADOS	38
7.3	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN	43
7.3.1	<i>Captación Sanchina 2</i>	43
7.3.2	<i>PEAS Lomas de San Andrés 1</i>	49
7.3.3	<i>PTAP La Mochita</i>	50
8	CONCLUSIONES.....	56
8.1	COMENTARIOS	56
8.2	CONCLUSIONES	56
8.3	TRABAJOS FUTUROS.....	59

BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXO A.	66
PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE [50]	66
TRATAMIENTO DE AGUA SERVIDA [51]	67
FOTOGRAFÍAS DE MEDICIONES EN TERRENO EN SANCHINA N°2.....	68
FOTOGRAFÍAS DE MEDICIONES EN PEAS LOMAS DE SAN ANDRÉS 1.....	71
FOTOGRAFÍAS DE PTAP LA MOCHITA	73
FÓRMULAS UTILIZADAS EN POWER BI	75



Nomenclatura

Escalares

V_{LL}	: voltaje de línea.
V	: voltaje de fase.
I	: corriente de fase.
P	: potencia activa.
Q	: potencia reactiva.
S	: potencia aparente.
L	: inductancia.
C	: capacitancia.
Z	: impedancia.
EP	: energía activa.
EQ	: energía reactiva.
D	: demanda.
φ	: desfase entre el voltaje de línea y corriente de fase.
f	: frecuencia de la red [Hertz].
$f_{resonancia}$	: frecuencia de resonancia de la red [Hertz].
T	: periodo.



Abreviaciones

Mayúsculas

FP	: Factor de Potencia.
THD	: Distorsión Armónica Total.
THDv	: Distorsión Armónica Total de Voltaje.
THDi	: Distorsión Armónica Total de Corriente.
FFT	: Transformada Rápida de Fourier.
PTAP	: Planta de Tratamiento de Agua Potable.
PTAS	: Planta de Tratamiento de Agua Servida.
PEAP	: Planta de Elevación de Agua Potable.
PEAS	: Planta de Elevación de Agua Servida.
TC	: Transformador de Corriente.
NT	: Norma Técnica.
PCC	: Punto de Conexión Común.
VDF	: Variador de Frecuencia.
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
SEC	: Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
IEC	: International Electrotechnical Commission.
TGFyC	: Tablero General de Fuerza y Control.
HH	: Horas Hombre.
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition.
AS	: Agua Servida.
AP	: Agua Potable.
MFP	: Mal Factor de Potencia.

Minúsculas

c.c.	: corriente continua (en inglés es d.c.).
c.a.	: corriente alterna (en inglés es a.c.).
p.u.	: por unidad

1 Introducción

1.1 Introducción

En este capítulo se presenta el contexto general que motiva este estudio, centrado en la necesidad de mejorar la calidad de la energía en instalaciones sanitarias operadas por Essbio. Se expone el problema del bajo factor de potencia, las consecuencias asociadas y los objetivos que guían esta memoria. Además, se detallan el alcance del trabajo y los criterios considerados para su desarrollo.

1.2 Contexto general

En la era de la transición energética y la eficiencia operacional, la gestión del factor de potencia ha surgido como un desafío técnico-económico clave para la industria en búsqueda de la optimización del recurso energético. A nivel global, organismos como la IEEE y la IEC han establecido que un factor de potencia óptimo no solo reduce pérdidas en redes de distribución, sino que también prolonga la vida útil de los equipos eléctricos debido a que se mitiga el estrés térmico del sistema [6]. Chile, siguiendo estas directrices internacionales, ha implementado mediante la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) exigentes estándares de calidad que penalizan operaciones con FP inferior a 0,93 a los clientes libres (dependiendo del tipo de contrato) y regulados exceptuando a los clientes residenciales, buscando optimizar el uso de la infraestructura eléctrica nacional [43].

El FP es un indicador que expresa la eficiencia con la que una instalación eléctrica utiliza la energía que le suministra la red. Su valor oscila entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 indica un uso eficiente de la energía. Un FP bajo implica una alta presencia de energía reactiva —necesaria para el funcionamiento de equipos como motores y transformadores, pero que no produce trabajo útil—, lo que genera mayores pérdidas, sobrecargas en el sistema eléctrico y en el caso de Chile, penalizaciones económicas para el consumidor [42].

El sector sanitario enfrenta retos particulares en este ámbito. Su operación continua por 24 horas, con cargas inductivas variables y la creciente incorporación de electrónica de potencia, generan condiciones adversas para mantener un FP dentro de los límites exigidos por la normativa chilena.

Esta complejidad se acentúa por tres factores clave: la distribución geográfica de sus instalaciones, la diversidad tecnológica de sus equipos y la necesidad de garantizar un suministro ininterrumpido. La combinación de estos elementos crea un escenario donde los problemas de calidad de energía no sólo generan multas cuantiosas, sino que también pueden afectar la confiabilidad operacional y generar dificultades en la toma de decisiones para abordar problemas de calidad de energía.

En este contexto, las soluciones tradicionales, basadas en bancos de condensadores fijos muestran limitaciones crecientes, por lo que actualmente se incorporan otros elementos para la compensación de la energía reactiva, ya sea en sustitución o en adición a los bancos de condensadores [6]. La evolución tecnológica de los últimos años, con mayor presencia de variadores de frecuencia y sistemas de control digital, ha transformado el perfil armónico de las instalaciones, requiriendo enfoques más sofisticados que consideren tanto la compensación reactiva como la distorsión armónica [7]. Los compromisos de sostenibilidad, como los establecidos en la Ley 21.305 [23], exigen reducir pérdidas energéticas para mejorar la eficiencia de los sistemas eléctricos.

1.3 Planteamiento del problema

Essbio es la segunda sanitaria más grande del país y tiene territorio operacional en las regiones de O'Higgins, Maule, Biobío y Ñuble. Su función principal es la producción de agua potable y el saneamiento de las aguas servidas de las localidades contenidas en cada región. Su gran cantidad de recintos esta distribuida a lo largo de todas estas regiones lo que produce dificultades por su amplia distribución geográfica. Debido a esto, es necesario generar estrategias que apunten a efficientar costos de HH.

Los procesos productivos de Essbio tienen una alta dependencia de la energía eléctrica, con cargas predominantemente inductivas (bombas, motores, sopladores) y una creciente presencia de equipos con electrónica de potencia [50]. Esto, sumado a la dispersión geográfica de sus recintos, convierte la gestión energética en un desafío estratégico. Las multas recurrentes por bajo factor de potencia, junto con el envejecimiento de algunos sistemas de compensación, revelan la necesidad urgente de implementar una gestión estructurada de la calidad de la energía.

En este contexto, una estrategia de monitoreo, análisis y corrección de variables, como el factor de potencia, la distorsión armónica y las demandas máximas, no solo permitiría cumplir con la normativa vigente, sino que contribuiría directamente a la continuidad del servicio, a la sostenibilidad ambiental y a la reducción de costos operacionales para la compañía.

Uno de los desafíos que enfrentan las empresas sanitarias con respecto a la eficiencia energética radica en la dificultad para mantener un factor de potencia adecuado en sus diversas instalaciones. Aunque el problema se manifiesta a través de multas recurrentes, su origen es más profundo y multicausal. Por un lado, los métodos actuales para diagnosticar las causas del bajo factor de potencia son limitados [49], basándose principalmente en análisis retrospectivos de facturas eléctricas que ofrecen una visión fragmentada del problema. Adicionalmente las soluciones de compensación implementadas suelen ser genéricas y estáticas, incapaces de adaptarse a las variaciones operacionales y a las particularidades de cada instalación.

La Tabla 1.1 muestra un desglose de las multas aplicadas a clientes regulados y libres de Essbio durante el año 2024, categorizadas por proceso productivo. Los datos revelan que los clientes regulados son los más afectados, tanto en cantidad de multas como en montos totales, especialmente en los procesos de Recolección AS.

Proceso Productivo	Cientes regulados	Cientes Regulados con multa	Multa FP (cliente regulado)	Cientes libres	Cientes libres con multa	Multa FP (cliente libre)
Producción AP	272	51	\$47.115.051	84	20	\$25.436.383
Distribución AP	262	21	\$17.051.845	6	2	\$1.392.741
Tratamiento AS	75	16	\$12.313.594	60	10	\$7.743.479
Recolección AS	497	151	\$68.545.460	8	4	\$1.492.005
Total	1106	239	\$145.025.950	158	36	\$36.064.608

Tabla 1.1: Cantidad de clientes y multas por factor de potencia de Essbio en el año 2024.

Esta situación se agrava por la ausencia de sistemas de monitoreo continuo que permitan una gestión preventiva. Sin información en tiempo real sobre el comportamiento de las cargas eléctricas,

las empresas se ven obligadas a actuar de manera reactiva, implementando correcciones cuando los problemas ya se han materializado en sanciones económicas o daños a los equipos. El resultado es un círculo vicioso donde los costos operacionales aumentan, mientras la eficiencia energética disminuye.

El presente trabajo busca abordar este problema desarrollando un enfoque integral que combine diagnóstico preciso, monitoreo continuo y soluciones de compensación adaptativas. La propuesta parte del reconocimiento de que cada instalación tiene características únicas que requieren soluciones específicas, pero al mismo tiempo busca establecer principios generales aplicables a diversos contextos operacionales. Esto representa un avance significativo respecto a los enfoques tradicionales, que suelen tratar el factor de potencia como un problema aislado con soluciones estandarizadas y a su vez las soluciones tradicionales que se aplican son lentas e ineficientes en algunos casos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar una estrategia integral para la corrección del factor de potencia en los recintos de Essbio, con el fin de reducir penalizaciones económicas, mejorar la calidad del suministro eléctrico y optimizar la eficiencia energética de la empresa.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar los recintos de Essbio y Nuevosur que presentan problemas de calidad de energía y que generan multas por bajo factor de potencia.
- Analizar el comportamiento eléctrico de los sistemas en los recintos identificados, evaluando sus condiciones operativas y su impacto en el consumo energético.
- Determinar las principales causas que afectan la calidad de energía y que contribuyen al alto consumo potencia reactiva y a las multas por factor de potencia.
- Proponer estrategias de mitigación, justificadas mediante cálculos y/o simulaciones, para corregir los problemas identificados.
- Desarrollar herramientas analíticas que permitan mejorar la toma de decisiones en planificación, operación y mantenimiento, optimizando el uso de la energía y asegurando la continuidad del suministro eléctrico.

1.5 Alcances y limitaciones

- El estudio se centra en las variables eléctricas que se puedan medir con el equipamiento e instrumentos disponibles en las plantas, ya que no se contó con un equipo de medición portátil con una calibración certificada para estudio. Por ello, se aprovecharon los analizadores de red presentes.
- El análisis se centra en 3 recintos de Essbio como un plan piloto, donde se realiza un estudio del sistema para realizar las pruebas de cálculo.
- La herramienta de cálculo que será parte del análisis será creada a partir de software provistos por la empresa Essbio.



2 Marco Teórico

2.1 Introducción

En el presente capítulo se entregan los fundamentos conceptuales necesarios para comprender el fenómeno del factor de potencia, la energía reactiva, la distorsión armónica y sus efectos en sistemas eléctricos. También, se revisa la normativa chilena vigente en materia de eficiencia energética, penalizaciones por bajo FP y criterios de compensación de reactivos exigidos a los clientes.

2.2 Exigencias regulatorias del factor de potencia

En Chile, el cobro por bajo factor de potencia está regulado por la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución [43], fiscalizada por la SEC. La Norma Técnica establece los límites del factor de potencia medido en el punto de conexión del cliente, el cual debe mantenerse dentro de 0,95 capacitivo y el 0,93 inductivo, entonces los consumidores tienen la responsabilidad de operar sus instalaciones de manera que se encuentre dentro de este rango, puesto a que si el factor de potencia es inferior al rango que exige la normativa se aplicará un cargo económico donde por decreto se cargará en un 1% por cada 0,01 en que dicho factor baje de 0,93.

Cuando la empresa distribuidora detecta un incumplimiento a la exigencia dispuesta, la empresa da el aviso junto a la boleta de facturación más próxima a la medición en que el incumplimiento se haya registrado, esto es un problema porque si no se tienen equipos de medición y un monitoreo de la energía activa y reactiva, el aviso se recibirá con un mes de atraso y junto con el tiempo que se requiere para realizar acciones correctivas, entonces surge la necesidad de encontrar formas de agilizar este proceso.

En la NT [43] se especifica que, si el cliente cuenta con un equipo de medición que permita registrar el consumo de potencia reactiva de manera agregada, el factor de potencia podrá ser calculado de acuerdo con la ecuación (2.1).

$$FP_{mensual} = \cos \left(\arctg \left(\frac{EQ_{mensual}}{EP_{mensual}} \right) \right) \quad (2.1)$$

Donde:

- $FP_{mensual}$: Factor de Potencia mensual.
- $EQ_{mensual}$: Energía reactiva mensual, en [kVARh].
- $EP_{mensual}$: Energía activa mensual, en [kWh].

2.3 Distorsión Armónica

La distorsión armónica es una deformación de las formas de onda de la fundamente de voltaje y corriente causada por cargas no lineales como por ejemplo los variadores de frecuencia, computadores, o iluminación LED. Su presencia afecta la calidad de la energía, el factor de potencia y la eficiencia de los sistemas eléctricos.

La distorsión armónica de corriente y voltaje se calcula mediante las ecuaciones (2.2) y (2.3), respectivamente.

$$\%THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$\%THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Los armónicos representan un riesgo operacional crítico al degradar la calidad energética, reducir la vida útil de los equipos, aumentar la demanda máxima por corrientes adicionales, y deteriorar el factor de potencia. La relación cuantitativa entre la distorsión armónica total (THD) y el factor de potencia se establece mediante (2.4), permitiendo un diagnóstico preciso y acciones correctivas dirigidas.

$$FP_{total} = \cos(\phi) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (2.4)$$

Es importante mantener un control de la distorsión armónica, pues se reduce el factor de potencia entre mayor sea la distorsión armónica. En casos donde el THD sea superior al soportado por los bancos de condensadores ($THDv > 8\%$) puede que se requieran filtros para corregirlo [7].

Los analizadores de red emplean métodos como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para descomponer las señales de voltaje y corriente en sus componentes armónicos. Este análisis permite cuantificar el porcentaje de distorsión individual para cada armónico [45]. La identificación de estos armónicos es fundamental para prevenir fenómenos de resonancia, que ocurren cuando la frecuencia de un armónico coincide con la frecuencia natural del circuito (2.5). Esta condición genera una peligrosa amplificación de voltaje que puede dañar equipos sensibles como bancos de condensadores.

$$f_{resonancia} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

La inductancia equivalente de la red está dada por los transformadores y los cables del sistema y la capacitancia de la red proviene de los bancos de condensadores es relevante realizar este estudio de resonancia cuando se instala bancos de condensadores para que esta no coincida con algún armónico presente en la red.

2.4 Análisis bibliográfico

En la actualidad se han realizado varios estudios para la compensación de la energía reactiva buscando reducir las multas, existen varios casos de éxito utilizando distintos tipos de soluciones. La compensación más clásica es la utilización de bancos de condensadores, como en los casos de estudio de [18] y [27], que demuestran casos exitosos de compensación de reactivos con bancos fijos, reduciendo las multas hasta un 30%, su fórmula clave para la determinación de la magnitud de los bancos fue la ecuación (2.6):

$$EQ_c = EP \cdot (\tan(\cos(FP_i)) - \tan(\cos(FP_f))) \quad (2.6)$$

Como los sistemas eléctricos por lo general son dinámicos, donde los consumos de energía reactiva pueden variar, y para evitar que los bancos de condensadores trabajen durante momentos donde no se requieren en [1] y [17] proponen el uso de un PLC para tener un sistema de compensación automática ajustando los bancos de condensadores en tiempo real según la demanda reactiva.

Los estudios de [7] y [24] demuestran que, en redes con presencia de armónicos, la implementación de bancos de condensadores requiere necesariamente filtros complementarios. Esto se debe a que los armónicos característicos de orden 5° y 7° pueden interactuar con la impedancia del sistema produciendo resonancia, lo que se mitiga mediante la incorporación de inductancias en serie para desplazar dichas frecuencias fuera del rango crítico. Adicionalmente, ambos autores coinciden en que la instalación de bancos de condensadores solo es recomendable cuando la distorsión armónica total (THD) es inferior al 5%, garantizando así la estabilidad del sistema

En [6] y [25] se dice directamente que ante cargas altamente dinámicas los bancos de condensadores son menos eficaces para la corrección del factor de potencia y menos precisos que un filtro activo por la falta de corrección dinámica, pero en [4] se menciona que el costo de los bancos con respecto a un filtro activo puede ser de tres a cinco veces menor que un filtro activo y debido a que un filtro activo utiliza una electrónica más compleja, la mantención de los bancos es más simple en comparación.

Existen casos donde no habrá una solución única para la corrección del factor de potencia existe, la posibilidad de realizar un filtro activo híbrido, que resulta de la combinación de un banco de condensadores y un filtro activo, para lograr compensar energía reactiva como se plantea en [33] reduciendo así el tamaño del filtro y reduciendo los costos de este. Si se cuenta con las suficientes mediciones esta tecnología puede hasta trabajar de forma predictiva ante eventualidades, aprendiendo del proceso y así evitar que el factor de potencia caiga antes de que ocurra el peor escenario en menos de 50 ms como se dice en [34]. También en [22] se muestra que los filtros activos utilizan el control p-q para determinar las corrientes de compensación que debe generar el filtro para anular el armónico presente en la red esto es útil puesto que el filtro puede compensar los armónicos no deseados que pudieran provocar una resonancia en el sistema, dañando otros elementos como los mismos bancos de condensadores.

De todo este análisis se destaca la gran variedad de posibles soluciones para mejorar sistemas de distintos tamaños, niveles de potencia y de distintos tipos de carga, por lo que para determinar la solución óptima se deberán considerar, el costo de la inversión del activo, las perturbaciones del proceso, como el THD, el factor de potencia que tenga actualmente el sistema y el tipo de operación del proceso para determinar cuál será la solución óptima.

3 Metodología

3.1 Introducción

En esta sección se describe el enfoque metodológico utilizado para llevar a cabo el análisis, incluyendo el tipo de investigación, fuentes de datos, criterios de selección de recintos y herramientas de procesamiento. Se detalla además el procedimiento de validación de mediciones, el uso de visualización en Power BI, y la construcción del modelo de priorización técnica-económica.

3.2 Metodología actual de Essbio

El proceso actual de gestión del factor de potencia en Essbio sigue un enfoque reactivo con múltiples ineficiencias. La Figura 3.1 presenta un diagrama de flujo que sistematiza esta metodología.

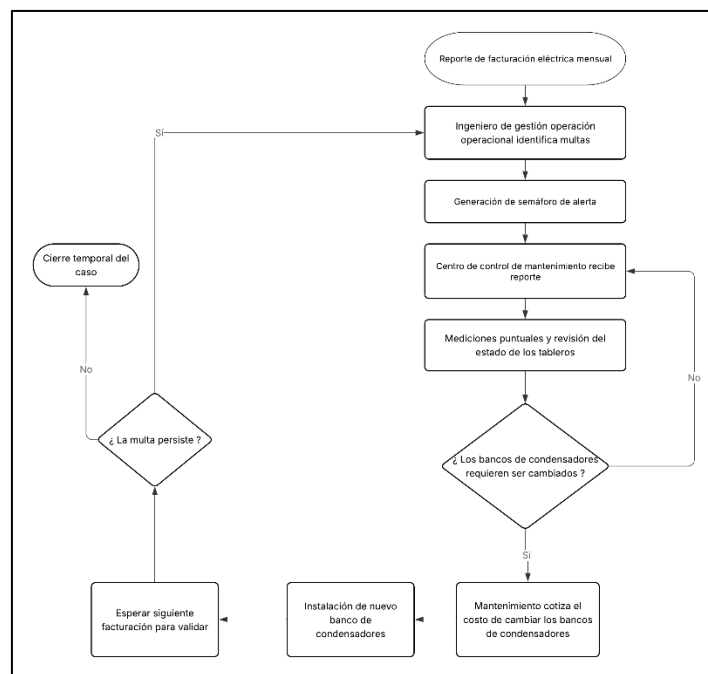


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso actual de gestión del factor de potencia en Essbio [49]

El ingeniero de gestión operacional revisa mensualmente los reportes de facturación eléctrica, los cuales llegan con un desfase de 30 días. A partir de estos datos, genera un sistema de “semáforos”, que indica la gravedad de las multas y envía las alertas al centro de control de mantenimiento. Sin embargo, este equipo no prioriza las correcciones de factor de potencia, ya que debe atender fallas

operativas urgentes, proyectos de infraestructura y otros análisis eléctricos críticos para la continuidad del servicio.

Cuando finalmente se asignan recursos, las acciones correctivas se limitan a mediciones puntuales y al reemplazo de bancos de condensadores, sin un diagnóstico técnico que identifique las causa raíz del problema. Además, al no existir monitoreo en tiempo real, los resultados solo pueden validarse con el siguiente reporte de facturación, lo que retrasa cualquier ajuste adicional. Este ciclo lento e ineficiente explica por qué muchas plantas reciben multas recurrentes incluso después de intervenciones previas.

La falta de horas hombre (HH) dedicadas exclusivamente a esta problemática agrava la situación. El personal de mantenimiento debe dividir su tiempo entre múltiples tareas, lo que dificulta realizar correcciones profundas o preventivas.

3.3 Instrumentación disponible

Para la medición de variables eléctricas, Essbio utiliza analizadores de red capaces de calcular potencia activa, reactiva, factor de potencia y, en equipos avanzados, THD del sistema. Si bien la mayoría de las plantas cuenta con estos dispositivos para monitoreo local del consumo eléctrico, los datos no están disponibles para consulta remota (vía web o SCADA). Adicionalmente, en recintos antiguos persisten sistemas análogos con amperímetros y voltímetros convencionales, los cuales carecen de capacidades de comunicación mediante protocolos digitales.

Los analizadores se instalan en el secundario del interruptor general de cada planta, utilizando una configuración en estrella para medición de voltaje. La corriente se mide mediante transformadores de corriente (TC) en cada fase, conectados en configuración delta. Esta disposición, ilustrada en la figura 3.2.

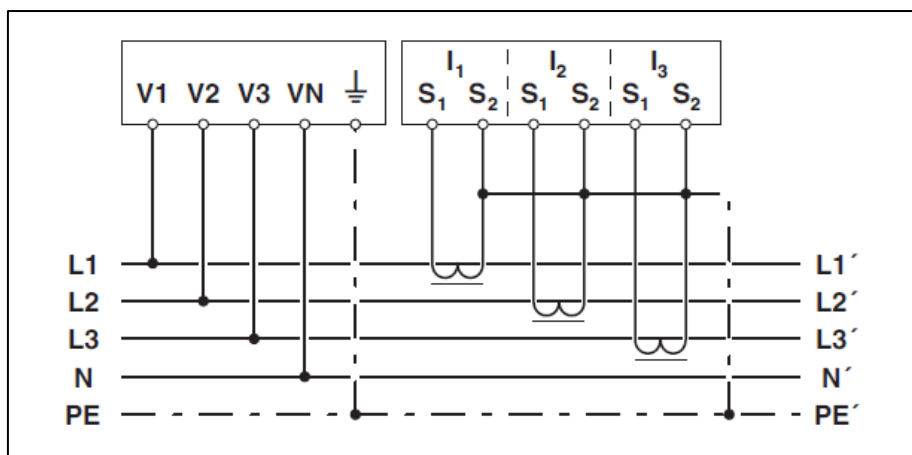


Figura 3.2: Conexión del analizador de red EMpro [45]

Para homogenizar los datos con frecuencias de muestreo diferentes a los 15 minutos, se implementó un proceso de normalización temporal que alinea las mediciones propias con los intervalos estándar de facturación. La validación de estos datos se realiza contrastándolos con los registros de la compañía distribuidora cuando estén disponibles de no ser posible, se compara el volumen de energía medido con el facturado en el mismo periodo, calculando el error porcentual para descartar datos inconsistentes. Cuando los analizadores presenten errores superiores al 5%, se considerarán inválidos y se procederá a reportar la falla y solicitar su calibración antes de nuevos intentos de medición.

El análisis se adapta según la configuración operativa de cada planta:

- Para sistemas con una única bomba, se contrastan las mediciones operativas con los valores nominales de placa, verificando tanto el cumplimiento de los parámetros de potencia como la ausencia de condiciones anómalas (operación en vacío o sobrecarga).
- En sistemas con múltiples bombas operando simultáneamente, se evalúan todos los perfiles de carga disponibles para identificar la condición operativa más desfavorable, la cual determina los requerimientos de compensación reactiva.

3.4 Metodología propuesta para la selección de recintos

La selección de los recintos se realizó mediante un análisis de la base de datos de facturación de la empresa, gestionada en Excel, a partir de la cual se identificaron las multas por factor de potencia registradas durante el año 2024 y hasta marzo de 2025.

Posteriormente, se llevaron a cabo reuniones con el equipo de control de gestión operacional y mantenimiento para priorizar los recintos de alto impacto. Para ello, se desarrolló un modelo polinómico que evalúe el impacto económico de implementar medidas correctivas en el factor de potencia, considerando los siguientes criterios

- **La magnitud de la multa (M):** Dado que las multas por factor de potencia representan costos evitables mediante medidas correctivas (como la instalación de bancos de condensadores), su corrección genera un impacto económico inmediato al reducir los costos operacionales y mejorar la eficiencia del proceso.
- **Permanencia de la multa (F):** Una multa recurrente indica deficiencias en el mantenimiento de los equipos (bombas, sistemas de control o bancos de condensadores). Mientras más persistente sea la penalización, mayor prioridad debe asignarse a la planta afectada, ya que esta condición puede derivar en fallas operacionales, como el mal funcionamiento de bombas.
- **Magnitud del factor de potencia (D):** Un factor de potencia bajo refleja problemas operacionales críticos. Valores inferiores al umbral normativo incrementan la energía reactiva, provocando sobrecargas en transformadores y conductores, mayores pérdidas energéticas y reducción de la eficiencia del sistema. Por ello, a menor factor de potencia, mayor urgencia en la implementación de acciones correctivas.
- **Críticidad del recinto (C):** Essbio, por la naturaleza de sus servicios, no puede permitir fallos recurrentes en sus instalaciones, dado que las interrupciones están sujetas a sanciones legales. Para este modelo, se clasifican como críticas las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) porque garantizan el suministro continuo y evitan discontinuidades en los sistemas productivos y a las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), debido a su falla genera desbordes de aguas residuales, acumulación de gases y emisión de olores, impactando a la comunidad y al medio ambiente.

Considerando los factores antes mencionados, se deriva el polinomio de la ecuación (3.1), donde cada variable se asocia con un coeficiente de ponderación que refleja su importancia relativa en el análisis. La magnitud de estos coeficientes determina el peso específico asignado a cada indicador estableciendo que, a mayor valor del coeficiente, mayor es la prioridad otorgada al factor correspondiente dentro del modelo de decisión.

$$P_{prioridad} = \alpha \cdot M + \beta \cdot F + \gamma \cdot D + \delta \cdot C \quad (3.1)$$

Donde las variables se calculan mediante las ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4).

$$M = \frac{\text{Suma total multas [\$]}}{\text{Maxima multa registrada [\$]}} \quad (3.2)$$

$$F = \frac{\text{Nº de multas}}{\text{Nº de meses analizados}} \quad (3.3)$$

$$D = \frac{\text{Suma total multas [\$]}}{\text{Total neto facturado [\$]}} \quad (3.4)$$

Para la criticidad del recinto se asigna $C = 1$ para recintos críticos, y $C = 0$ para recintos no críticos.

En este polinomio de priorización se le asigna un peso a cada variable mencionada (Tabla 3.1), donde entre mayor sea el valor entregado por el polinomio mayor es la prioridad que se le deberá establecer.

Factor	Variable	Coeficiente
Magnitud multa	M	$\alpha = 0,4$
Frecuencia multas	F	$\beta = 0,3$
Porcentaje de multa por FP	D	$\gamma = 0,2$
Criticidad operacional	C	$\delta = 0,1$

Tabla 3.1: Asignación del peso de cada factor

La validación del polinomio se realiza mediante pruebas de sensibilidad para demostrar su capacidad para identificar correctamente los casos más urgentes. Por ejemplo, cuando se aplica a plantas con multas elevadas, pero factor de potencia cercano al límite regulatorio, estas recibieron menor prioridad que instalaciones con multas moderadas, pero problemas técnicos más graves. Además, el ranking muestra un 85% de coincidencia con la priorización manual realizada por los expertos de Essbio, lo que confirma su alineación con el conocimiento operativo de la empresa.

Como parte del análisis, se construyó un dashboard interactivo en Power BI, que integra datos de consumo energético, multas por factor de potencia, y características operativas de cada planta. Esta herramienta facilita la generación de indicadores clave como: recintos con mayor penalización, evolución mensual de multas, y mapas de calor georreferenciados para identificar zonas críticas. La visualización interactiva permite, además, entregar información procesada al equipo técnico y directivo de la empresa, sirviendo como insumo para la toma de decisiones operativas y de inversión.



4 Propuesta de estrategia

4.1 Introducción

El presente capítulo establece un marco estratégico integral para abordar las deficiencias identificadas en la gestión del factor de potencia en los recintos de Essbio. Se estructura en dos ejes principales: acciones correctivas para mitigar penalizaciones económicas, y medidas preventivas para garantizar el cumplimiento normativo sostenible. La propuesta combina soluciones técnicas, con mejoras en los procesos de gestión operativa, priorizando intervenciones basadas en criterios técnico-económicos.

4.2 Plan de acción para realizar acciones correctivas para el FP

Para garantizar la efectividad de las correcciones, se propone integrar un ingeniero especialista en sistemas eléctricos de baja tensión al equipo de Control de Gestión Operacional, quien articulará el análisis técnico con la ejecución de mantenimiento (Figura 4.1). Este profesional cerrará la brecha entre la identificación de problemas y su solución definitiva, evitando ciclos de retrabajo.

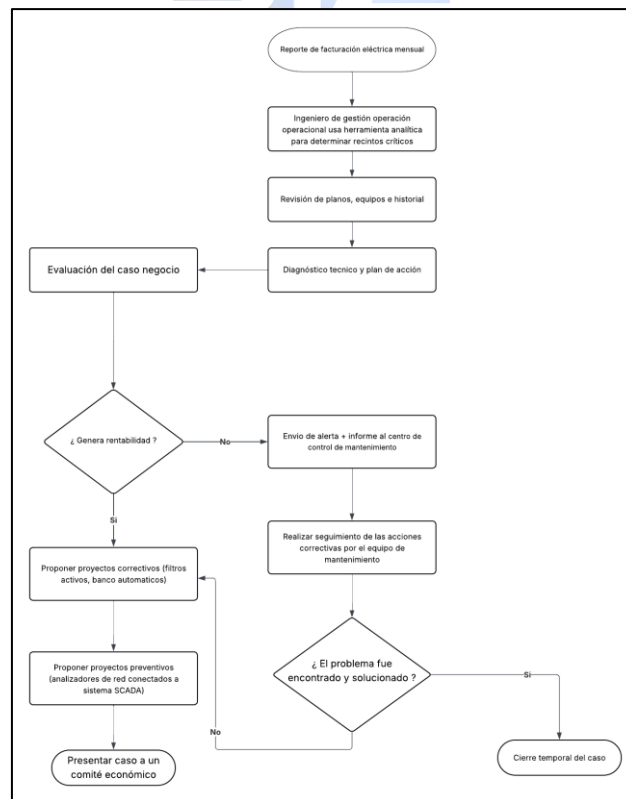


Figura 4.1: Diagrama de flujo del plan de acción propuesto para realizar acciones correctivas para el FP.

El ingeniero especialista no solo generará alertas, sino que realizará:

- Revisión de historial de multas para identificar patrones y causas recurrentes.
- Evaluación de planos para analizar la configuración actual de la planta.
- Análisis de datos de placa de equipos (motores, transformadores, bancos de condensadores) para verificar compatibilidad y eficiencia.
- Generación de informes técnicos con diagnósticos de las causas del mal factor de potencia y propuestas de solución.
- Elaboración de un plan de implementación detallado, incluyendo cronogramas, recursos necesarios y etapas de ejecución.
- Monitoreo continuo del factor de potencia y otros indicadores de eficiencia energética post-implementación.
- Evaluación de la instrumentación de la planta para garantizar que los equipos de medición y control sean adecuados.
- Análisis de sistemas de control y monitoreo existentes, proponiendo mejoras en automatización si es necesario.
- Desarrollo de casos de negocio que justifiquen las inversiones en mejoras, evaluando costos, ahorros potenciales y rentabilidad del proyecto.
- Propuesta de soluciones rentables, como optimización de bancos de capacitores, renovación de equipos obsoletos o integración de tecnologías más eficientes.

Esto permitirá generar un plan de acción detallado, que incluya diagnósticos de causas raíz (como distorsión armónica o mal dimensionamiento de bancos de condensadores) y recomendaciones técnicas específicas. Adicionalmente, identificará oportunidades para implementar mejoras estructurales, como la instalación de equipos de medición en línea (analizadores de red con comunicación SCADA) o sistemas de compensación avanzada (filtros activos, bancos automáticos), justificando su implementación mediante análisis costo-beneficio. Este proceso asegura que las intervenciones se basen en causas técnicas comprobadas, no en suposiciones para que el equipo de mantenimiento realice sus labores de una manera más eficiente.

El proceso se apoyará en la herramienta analítica para detectar patrones y priorizar intervenciones, reduciendo la dependencia de ciclos manuales. Idealmente, esta estrategia permitirá disminuir las multas por factor de potencia en al menos un 15% en un año, al evitar correcciones

empíricas y multas recurrentes. Además, el monitoreo continuo y las acciones preventivas derivadas de este análisis técnico contribuirán a reducir costos operacionales directos (penalizaciones) e indirectos (pérdidas por ineficiencia energética).

Para reducir el tiempo de espera asociado a la facturación mensual, se propone:

- Mediciones locales inmediatas post-intervención con analizadores de red portátiles, comparando el FP antes y después de la corrección.
- Monitoreo remoto en plantas críticas mediante equipos con comunicación SCADA, para poder prevenir multas, por la detección temprana de los problemas con respecto al factor de potencia.

La implementación de analizadores de red con comunicación permitirá a Essbio transitar de un modelo correctivo a uno preventivo.

4.3 Plan de acción para realizar acciones preventivas para el FP

Actualmente, Essbio no cuenta con una estrategia integral para abordar las deficiencias en el factor de potencia y la calidad de la energía. El Departamento de Gestión Energética monitorea la facturación y emite alertas correctivas. Sin embargo, la falta de datos históricos y análisis técnicos continuos limita la efectividad de las acciones. Para optimizar las soluciones, se propone implementar herramientas de monitoreo en tiempo real (SCADA, analizadores de red) y un sistema de priorización basado en datos, que permita focalizar las intervenciones en los puntos críticos, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia energética.

Se propone la implementación de un sistema de monitoreo continuo y automatizado del factor de potencia en recintos de alto consumo, utilizando analizadores de red fijos. Los equipos deben cumplir con parámetros mínimos de medición, incluyendo voltaje de línea y fase, corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, THD y perfiles de demanda en intervalos de 15 minutos. Los datos se visualizan mediante un dashboard centralizado que muestra tendencias históricas, alertas automáticas y reportes periódicos, integrados con herramientas de análisis energético.

Para mediciones complementarias en terreno, se utilizan analizadores portátiles (como el Fluke 435, que reúne todas las capacidades de medición requeridas para la evaluación del factor de potencia

[51]), calibrados anualmente. Las mediciones se realizan durante mínimo una semana para asegurar una lectura de todos los perfiles de la planta y se deberán instalar en puntos estratégicos como salida de transformadores o en el tablero general de fuerza.

En plantas con historial de obstrucciones, se recomienda implementar un sistema de seguimiento continuo del nivel de corriente. Generando alertas tempranas cuando la corriente supere umbrales predefinidos para que se prevenga ya sea la activación de las protecciones de sobre corriente o el atasco de la bomba.

Para prevenir problemas asociados al factor de potencia en los equipos de los procesos de Agua Servida (AS), especialmente en plantas de elevación donde la presencia de gases y elementos corrosivos afecta el funcionamiento de bombas y componentes eléctricos, se implementa un plan de mantenimiento preventivo integral. Este incluye:

- Se recomienda realizar una inspección visual anual de los bancos de condensadores para identificar daños físicos como abolladuras, deformaciones, etc.
- Medir la capacitancia de los bancos para garantizar su correcto funcionamiento.

Las PEAS representan un foco crítico en la gestión del factor de potencia, como lo demuestra el análisis de multas donde estas instalaciones que apenas representan el 9% del consumo energético total de Essbio, concentran el 37% de las penalizaciones. Esta discrepancia entre participación en el consumo y contribución a las multas revela deficiencias sistémicas que requieren un abordaje integral. El ambiente altamente corrosivo característico de estas plantas, con presencia permanente de gases sulfhídricos y humedad, acelera el deterioro de componentes eléctricos y bancos de condensadores, comprometiendo severamente su capacidad de compensación reactiva. Esta situación se agrava por el hecho de que, pese a su bajo porcentaje en el consumo global, el impacto financiero de las PEAS es mayor al esperado en términos de penalizaciones, evidenciando ineficiencias operativas y de mantenimiento específicas en estas instalaciones críticas.

Dado que las PEAS son instalaciones de baja potencia, pero con alta incidencia en multas por factor de potencia, cuando los datos históricos no permitan identificar la causa raíz de las desviaciones, se propone un protocolo de medición en terreno para detectar problemas ocultos (Figura 4.2).

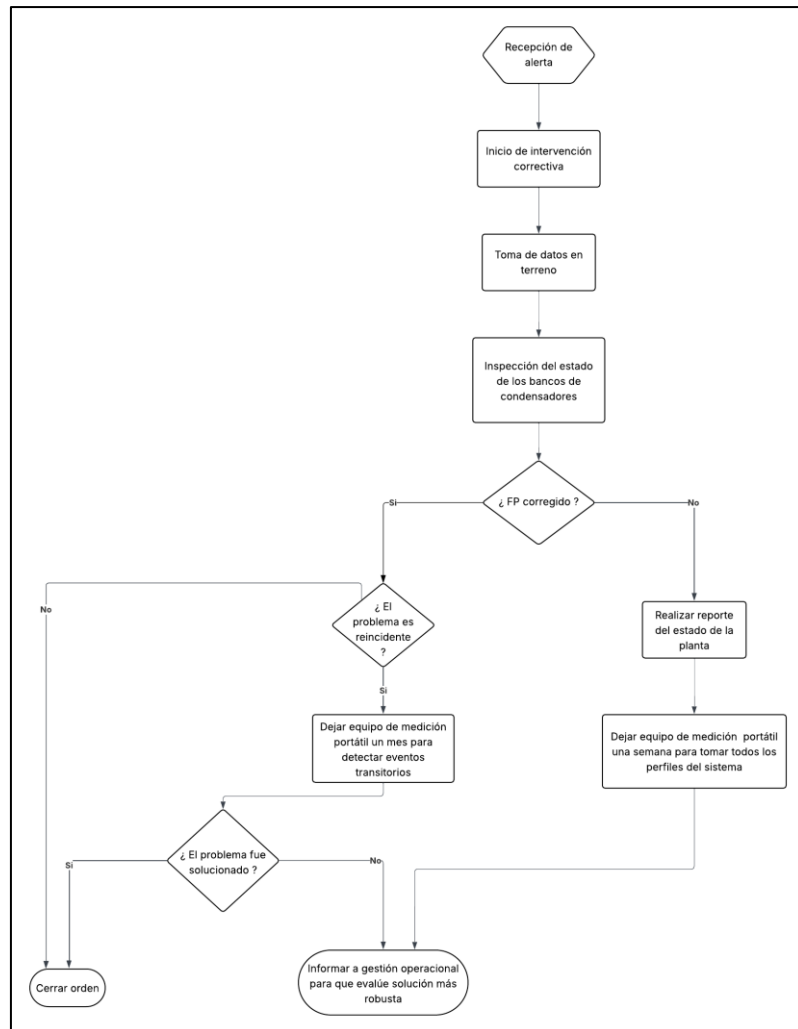


Figura 4.2: Diagrama de flujo del protocolo de medición

Este plan incluye mediciones exhaustivas con analizadores de red portátiles durante ciclos operativos completos, capturando perfiles de carga, THD y transitorios, para la evaluación de soluciones robustas cuando se identifiquen:

- Armónicos persistentes: Instalación de filtros activos.
- Motores/bombas con alto consumo reactivo: Reemplazo por equipos de alta eficiencia con corrección integrada.
- Bancos de condensadores ineficaces: Rediseño del sistema de compensación reactiva.

5 Herramienta Analítica

5.1 Introducción

Este capítulo presenta el desarrollo de una herramienta analítica basada en Power BI, diseñada para priorizar recintos de Essbio con problemas de calidad de energía. La herramienta integra datos históricos de facturación eléctrica, multas por bajo factor de potencia y variables operacionales, aplicando el modelo de priorización descrito en el capítulo 3. Su implementación permite identificar focos críticos, optimizar la asignación de recursos y reducir costos asociados a penalizaciones regulatorias. Adicionalmente, genera visualizaciones interactivas (mapas de calor, tendencias mensuales) que facilitan la toma de decisiones para el equipo de gestión operacional.

5.2 Base de datos servicios eléctricos

Los datos de consumo eléctrico se obtienen mediante la facturación eléctrica, por lo que responder ante eventos de factor de potencia es un proceso lento, porque se tiene que analizar una gran base de datos que contiene todos los servicios eléctricos de la compañía y mediante su análisis se puede obtener un reporte de las multas por factor de potencia. Este análisis no se realiza con la frecuencia requerida, debido a que la data de entrada está relacionada a los periodos de facturación. La necesidad actual es buscar una forma de optimizar la generación y el análisis de datos.

La base de datos actual de consumos eléctricos almacena información de facturación proveniente de las compañías distribuidoras, incluyendo la mayoría de las plantas que cuentan con número de cliente único. Sin embargo, presenta una limitación crítica: los registros utilizan nombres genéricos para identificar las instalaciones (por ejemplo: "*Recolección AS Concepción*"), lo que dificulta su asociación exacta con plantas específicas. Este nombre indica que corresponde a una Planta Elevadora de Aguas Servidas ubicada en Concepción, pero no permite distinguir entre las múltiples PEAS existentes en dicha ciudad. Esta ambigüedad genera demoras en el análisis y seguimiento de consumos, evidenciando la necesidad de desarrollar una base de datos unificada que vincule cada número de cliente con su planta correspondiente.

Para resolver esta limitación, se emplea una base de datos complementaria denominada *Base Servicios Eléctricos Essbio-Nuevosur*, la cual permite vincular los números de cliente con los nombres y ubicaciones específicas de los recintos. Mediante la herramienta Power Query, se realiza un cruce

de datos automatizado donde, para cada número de cliente registrado en la facturación, el sistema busca y asocia automáticamente el nombre de la planta correspondiente. Este método no solo agiliza la generación de reportes, sino que también permite segmentar la información por instalación y ubicación geográfica, mejorando la precisión del análisis energético.

5.3 Tablero de la facturación de servicios eléctricos

El tablero fue diseñado con el propósito de agilizar el análisis de los consumos eléctricos mediante la visualización estructurada de datos de facturación. Para ello, se implementaron indicadores personalizados que no estaban disponibles directamente en la base de datos. Uno de los principales es el "Recuento de recintos con multa FP", desarrollado mediante código DAX en Power BI. Este indicador calcula el número de clientes penalizados al contar las instancias donde los "*Recargos FP*" superan el valor cero, filtrando por número de cliente para evitar duplicaciones. Posteriormente, este resultado se contrasta con el total de clientes registrados en la base de datos, lo que permite obtener un porcentaje de incumplimiento y facilitar la identificación de tendencias o anomalías.

La base de datos de consumos eléctricos incluye los siguientes campos para filtrar y segmentar la información:

- **Comuna:** Permite agrupar los datos por ubicación geográfica.
- **Zonal:** Facilita el análisis por áreas operativas de la empresa.
- **Proceso productivo:** Clasifica las plantas en 6 categorías:
 1. Recolección AS
 2. Distribución AP
 3. Producción AP
 4. Tratamiento AS
 5. Comercial
 6. Administrativo

Estos filtros permiten realizar cruces de información precisos, evitando duplicidades o errores derivados de formatos discrepantes.

5.3.1 Hoja 1: Análisis Comparativo de Consumos y Multas

En la figura 5.1 se ilustra una captura de la primera página del tablero, el cual integra filtros clave (comuna, zonal, proceso productivo y fecha) para realizar un análisis estratégico del desempeño energético. Los componentes principales incluyen:

- 1. **Gráfico de anillo:** Visualiza la distribución del consumo energético (kWh) entre los seis procesos identificando de manera inmediata los sectores con mayor consumo y multas.
- 2. **Gráfico de barras comparativo:** Contrasta los recargos por factor de potencia con el consumo energético por proceso, revelando posibles correlaciones entre alto consumo y penalizaciones recurrentes.
- 3. **Gráfico de tendencia acumulada:** Muestra la evolución mensual de:
 - **Energía consumida (kWh).**
 - **Multas acumuladas (CLP),** permitiendo detectar patrones temporales y evaluar el impacto económico de las ineficiencias.

Esta estructura facilita la identificación de procesos críticos donde las acciones correctivas generarían mayor retorno.

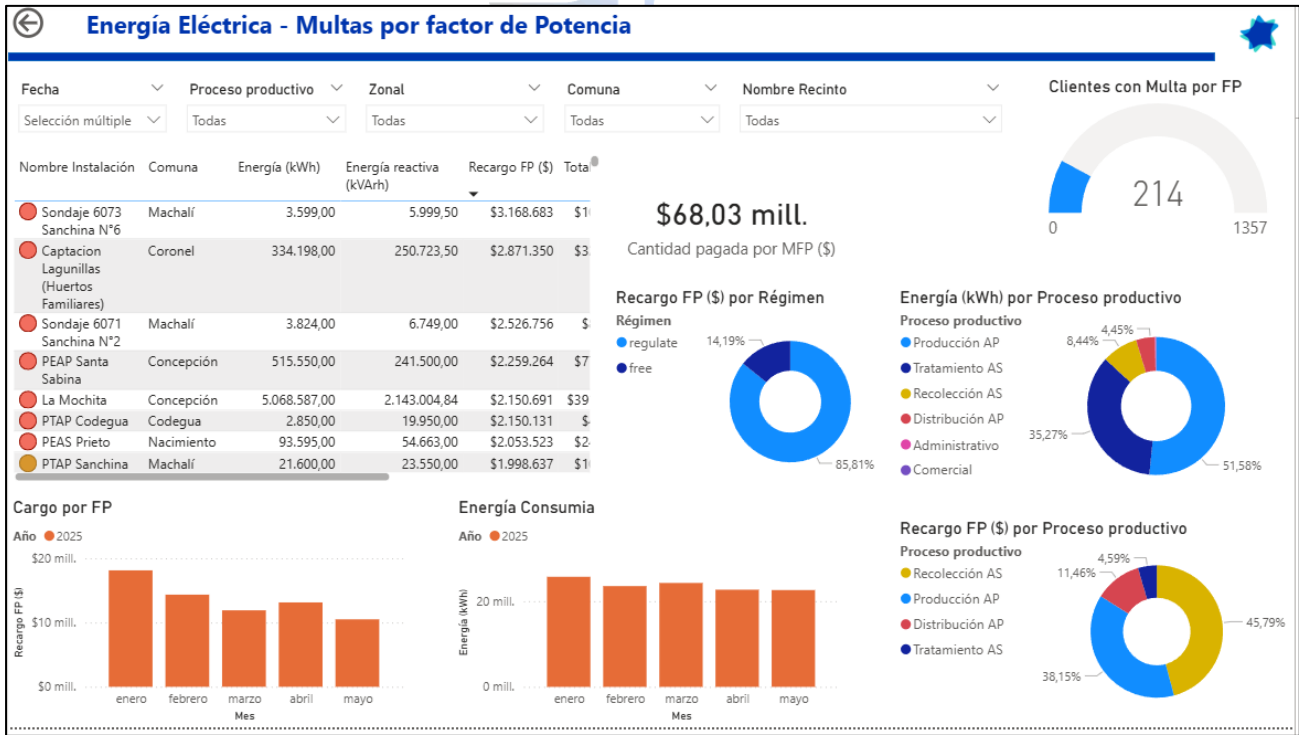


Figura 5.1: Tablero de Consumos y Multas por FP en 2025 (última actualización 10/06/2025).

El tablero muestra un panorama detallado del desempeño energético de las instalaciones de Essbio. Según los datos consolidados para el año 2025, de un total de 1,357 clientes registrados en la base de datos, 214 (equivalente al 15,77%) presentan multas por incumplimiento del factor de potencia. Esta información se visualiza mediante una tabla interactiva que incluye:

- Nombre de la instalación
- Comuna de ubicación
- Consumo energético acumulado (kWh)
- Monto acumulado de multas por FP (\$)
- Monto total neto (\$)

Los gráficos presentes en la figura 5.1 revelan que las mayores penalizaciones se concentran en plantas elevadoras de aguas servidas y en plantas de tratamiento de agua potable.

Un hallazgo relevante indica que el 85% de estas multas corresponden a clientes regulados, particularmente en instalaciones de baja potencia que carecen de sistemas de monitoreo continuo o personal operativo permanente. Esta situación deriva en:

- Falta de control en tiempo real
- Mantenimiento reactivo en lugar de preventivo
- Acumulación progresiva de problemas de calidad energética

Los datos estructurados en esta herramienta facilitan la priorización de intervenciones, especialmente en plantas críticas donde las multas recurrentes indican necesidades urgentes de modernización de equipos o implementación de sistemas de monitoreo remoto.

5.3.2 Hoja 2: Mapa de Calor Georreferenciado

Esta hoja transforma datos tabulares en inteligencia geográfica para la toma de decisiones:

- **Mapa de calor interactivo:**
 - Utiliza la columna "comuna" para ubicar espacialmente las plantas.
 - La intensidad del color (escala rojo-amarillo-verde) refleja el monto total de multas por FP, destacando zonas críticas como Concepción o Rancagua. }
- **Capa adicional de puntos críticos:**
 - Señala instalaciones donde el factor de potencia supera un umbral predefinido (multas sobre los \$500.000), incluso si ocurre múltiples veces en un mismo cliente.
 - Este indicador complementario ayuda a priorizar plantas con problemas crónicos, no solo por monto económico sino por frecuencia de incumplimiento.

El mapa de calor desarrollado (Figura 5.2) constituye una herramienta estratégica fundamental para la gestión energética, permitiendo identificar con precisión las zonas que presentan mayores desafíos en cuanto al factor de potencia. A través de su representación visual intuitiva, se detectan claramente los puntos críticos donde se concentran las multas más significativas, destacando particularmente las áreas de Concepción, Coronel y Rancagua como focos principales de incumplimiento. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para la toma de decisiones operativas y financieras. Al enfocar las acciones correctivas en las plantas ubicadas en estas zonas críticas, se logra maximizar el impacto de las intervenciones mientras se optimizan los costos asociados a esta.

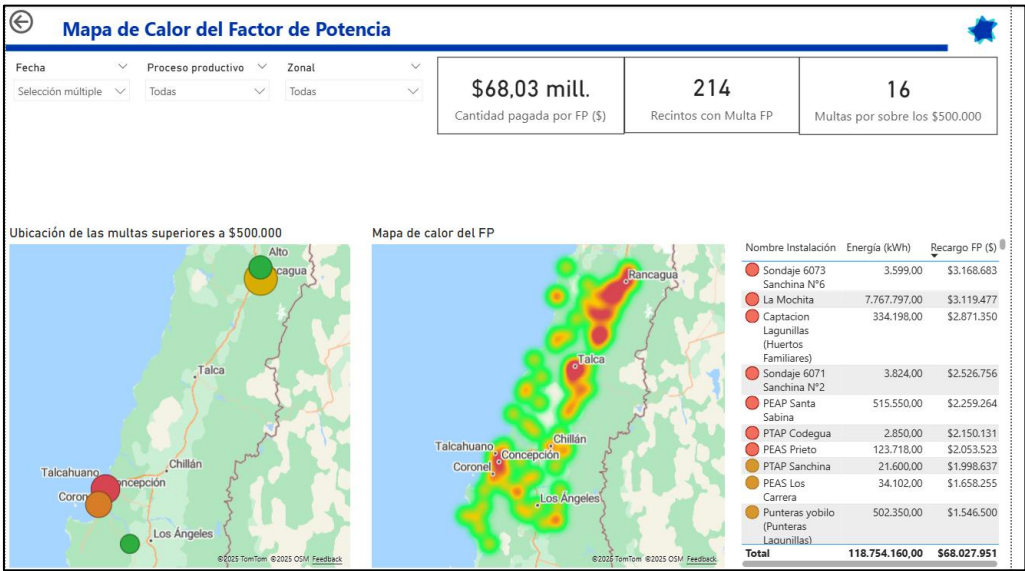


Figura 5.2: Mapa de Calor de las multas por factor de potencia 2025

La integración de esta herramienta en los procesos de gestión ha mejorado significativamente la comunicación entre los equipos técnicos y las gerencias zonales, al proporcionar datos concretos y visualmente accesibles. Los reportes generados a partir del mapa de calor sirven como base para justificar inversiones en mejoras técnicas y para evaluar el retorno de las medidas implementadas, cerrando así el ciclo de mejora continua en la gestión del factor de potencia.



6 Caso de estudio

6.1 Introducción

Este capítulo presenta un análisis exhaustivo de los recintos pertenecientes a Essbio, basado en información histórica de facturación y registros operacionales. Se identifican aquellos recintos que presentan multas recurrentes por bajo FP, se clasifican según su impacto económico y operativo.

6.2 Selección de recintos

Utilizando la base de datos de consumos energéticos correspondiente al período anual de 2024 y los primeros meses de 2025 (hasta marzo), se identificó un conjunto de plantas que, según el análisis polinomial, presentan un alto peso relativo en cuanto al impacto de implementar acciones correctivas (Tabla 6.1). Este análisis permitió definir las diez plantas con mayor incidencia.

Nombre Instalación	Resultado	Multa por FP
Sanchina N°2	1,92	\$9.539.380
Captación Lagunillas	1,7	\$ 8.437.850
La Mochita	1,67	\$ 9.915.141
PTAP Codegua	1,35	\$ 5.517.347
PEAS Lomas San Andrés 1	1,32	\$ 2.698.206
PEAS Los Carrera	1,21	\$ 3.891.176
Sanchina N°6	1,2	\$ 3.876.584
PEAP Santa Sabina	1,16	\$ 6.272.175
PTAP Sanchina	1,12	\$ 3.961.559
PEAS Penco-Lirquen	0,9	\$ 2.356.154
PEAS Talcahuano	0,83	\$ 2.601.311

Tabla 6.1: Resultado del polinomio de priorización.

El *ranking* generado muestra coincidencia con la priorización manual realizada por los expertos de Essbio (Tabla 6.2), lo que confirma la alineación del polinomio con el conocimiento operativo de la empresa. Como diferencia el ranking manual solamente fue realizado usando la magnitud de las multas de los últimos tres meses.

Nombre Instalación	Orden
PEAP Santa Sabina	1
La Mochita	2
Captación Lagunillas	3
Sanchina N°2	4
Sanchina N°6	5
PEAS Prieto	6
PTAP Codegua	7
Pozo San Gerónimo	8
PEAS Los Carrera	9
PEAS Lomas San Andrés 1	10
PEAS Penco-Lirquen	11
PEAS Talcahuano	12

Tabla 6.2: Priorización del seguimiento de cobros por Mal Factor de Potencia 27/02/25 [46]

6.3 Descripción recintos estudiados

El estudio se centra en tres plantas seleccionadas mediante el polinomio de priorización, herramienta diseñada para optimizar la asignación de recursos en sistemas complejos. La elección de este número específico responde a dos criterios fundamentales: primero, la necesidad de mantener un alcance manejable que permitiera análisis detallados en plazos razonables; segundo, la capacidad del polinomio para identificar los casos que combinaban mayor impacto potencial con diversidad de problemáticas.

La selección de estas tres plantas obedeció a su posición destacada en el *ranking* generado por el polinomio, donde aparecieron consistentemente como casos prioritarios independientemente de variaciones menores en los coeficientes de ponderación. Esta robustez en los resultados confirmó que representaban los puntos de intervención más estratégicos, donde las soluciones implementadas podrían generar aprendizajes aplicables a otras instalaciones con características similares.

Sanchina N°2: Es un recinto de Estanques ubicado en la ciudad de Machalí, perteneciente a la comuna de Rancagua de la sexta región de Chile. Debido a la grave situación de estrés hídrico de la localidad, la empresa se vio obligada a impulsar proyectos de resiliencia hídrica, esta consistió en implementar sondajes o pozos al interior del recinto, modificando su proceso y por ende, incluyendo nuevas cargas (1 bomba de 93 kW) para los empalmes eléctricos existentes y proyectados.

PTAP La Mochita: La planta abastece de agua potable a las ciudades de Concepción y Talcahuano, atendiendo aproximadamente a 200.000 clientes. El proceso productivo se inicia con la captación superficial de agua cruda desde el río Biobío, seguida de las etapas de depuración y posterior impulsión hacia los estanques de distribución. La magnitud de esta operación conlleva un considerable consumo energético, principalmente asociado al funcionamiento de los equipos de bombeo de alta capacidad: 7 bombas de 313 kW, 12 bombas de 117 kW y 4 bombas de 160 kW.

PEAS Lomas de San Andrés 1: Planta de elevadora de aguas servidas que cuenta con dos bombas de 11 kW, se encuentra en el sector de Lomas de San Andrés, y pertenece a un conjunto de plantas que se encargan de impulsar las aguas servidas del sector Lomas San Andrés de la ciudad de Concepción a la PTAS Biobío.

6.3.1 Captación Sanchina

El sistema productivo de Sanchina son un conjunto de son plantas de captación de agua potable mediante pozos pertenecientes a ciudad de Machalí, registrados en el sistema productivo se tienen cuatro plantas:

- Sondaje 6071 Sanchina N°2. (Potencia total 93 kW).
- Sondaje 6072 Sanchina N°3. (Potencia total 93 kW).
- Sondaje 6073 Sanchina N°6. (Potencia total 93 kW).
- PTAP Sanchina. (Potencia total 270 kW).

Las captaciones Sanchina 2, 3 y 6 comparten idéntica configuración técnica, incluyendo equipamiento, sistema de control y arquitectura de telemetría. Sin embargo, el análisis de las multas por factor de potencia mediante el polinomio de priorización reveló una disparidad crítica. La selección focalizada en la unidad 2, responde a su posición consistente en el quintil superior del *ranking* del polinomio, identificándolas como casos prioritarios para intervención.

Como parte de la infraestructura, la planta dispone de una bomba de impulsión, cuyas características técnicas según placa se enumeran en la Tabla 6.3.

Bomba Sanchina		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de Medida
Voltaje	380	V
Corriente	174	A
Potencia Eléctrica	93	kW
Potencia Mecánica	110	HP
Factor de potencia	0,81	
Eficiencia	88	%

Tabla 6.3: Valores nominales de la bomba Sanchina

El diagrama unilineal de la Figura 6.1 muestra la interconexión entre los principales componentes del sistema: el transformador, el variador de frecuencia, el analizador de redes y la UPS.

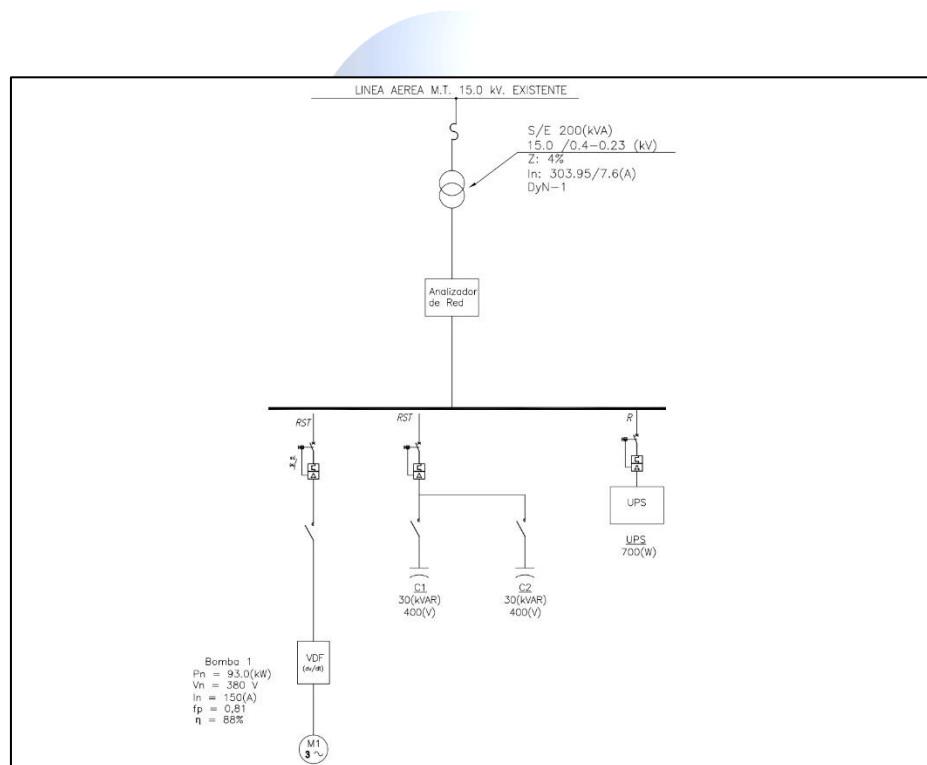


Figura 6.1. Diagrama unilineal de la captación Sanchina

La bomba funciona mediante un variador de frecuencia, que permite regular la velocidad del motor. En este caso, se emplea un variador Schneider ATV930 de 132 kW (200 HP), cuyo diseño corresponde a un ciclo conversor convencional [44].

En adición a la bomba en el recinto se encuentran dos bancos de condensadores de una potencia reactiva nominal de 30 kVAr. Estos condensadores se energizan junto con la partida de la bomba.

El transformador instalado en el recinto (Tabla 6.4) tiene un voltaje primario de 15 kV que se conecta a una línea aérea del mismo voltaje, y un voltaje secundario nominal de 0,4 kV trifásico, con un voltaje por fase es de 0,23 kV.

En la planta se cuenta además con un analizador de red Empro EEM-MA770-R, ubicado en el tablero general de fuerza de la planta. El equipo tiene la capacidad de medir voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, desfase entre voltaje y corriente, THD, y energía en instalaciones de baja tensión. Este se comunica mediante protocolo Modbus TCP mediante Ethernet.

Transformador de Sanchina		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de medida
Razón de Transformación	15/0,4	
Corriente Primerio	7,6	A
Corriente Secundario	303,95	A
Potencia Aparente	200	kVA
Impedancia	0,04	p.u

Tabla 6.4: Datos de placa del transformador de Sanchina

El analizador de red actualmente carece de conexión tanto con el PLC del recinto, como con el maestro de comunicaciones regional. Por lo tanto, para obtener sus datos, se debe establecer una comunicación local entre el analizador de red y el PLC de la planta, transmitir luego mediante radio al PLC maestro de comunicaciones y, finalmente, enviar la información al sistema SCADA. El sistema completo consta de un transformador, con un analizador de red, una UPS y la bomba como la carga principal, lo que se ve reflejado en la figura 6.1, por lo que el analizador de red de la planta, según la configuración actual puede ver la misma energía que el medidor de la compañía eléctrica.

6.3.2 PEAS Lomas de San Andrés 1

Este recinto es una planta elevadora de aguas servidas ubicada en la ciudad de Concepción, está en el sector Lomas de San Andrés y este posee dos bombas para la elevación del agua servida (valores nominales en la Tabla 6.5), y la planta opera en condición 1+1.

Bomba PEAS Lomas de San Andrés 1		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de Medida
Voltaje	380	V
Corriente	23	A
Potencia Eléctrica	11	kW
Potencia Mecánica	12,5	HP
Factor de potencia	0,81	
Eficiencia	85	%

Tabla 6.5: Valores nominales de la bomba PEAS Lomas de San Andrés 1

Actualmente el recinto no cuenta con equipos para la compensación de energía reactiva disponibles. Las bombas funcionan con partida directa accionadas con un PLC.

En el recinto se cuenta con un analizador de red SATEC PM130E, que tiene la capacidad de medir voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia, pero no tiene la capacidad de analizar THD. La comunicación se realiza a través de RS-485 usando Modbus RTU como protocolo.[47].

6.3.3 PTAP La Mochita

Esta es la planta de agua potable más grande de la compañía, ubicada en la localidad de Concepción. Utiliza una captación superficial del río Biobío para obtener agua cruda, la cual pasa por una serie de procesos físico-químicos para purificar y potabilizar, haciéndola apta para el consumo humano. Desde esta planta, el agua tratada se impulsa a cuatro estanques mediante bombas elevadoras.

La Mochita cuenta con dos empalmes por lo que presenta dos números de clientes asociado a la planta, por lo que para analizar esta planta hay que considerar cada punto de conexión de manera individual. Donde el empalme 1 concentra el consumo más alto de energía y una persistencia de multas por factor de potencia.

La planta cuenta con dos transformadores de idénticas características nominales (Tabla 6.6), cada uno destinado a alimentar sectores productivos diferenciados: el primer empalme suministra energía a los grupos de bombeo Cerro Chepe Concepción y Cerro Chepe Talcahuano (etapa de impulsión de agua potable, cuya configuración se detalla en la Figura 6.2), mientras que el segundo empalme alimenta la etapa de captación de agua cruda, los grupos de elevación hacia los estanques Caracol y Lonco, y el sistema de lavado de filtros, cuya disposición se ilustra en la Figura 6.3.

Transformador de PTAP La Mochita		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de medida
Razón de Transformación	15/0,4	kV
Corriente Primerio	77	A
Corriente Secundario	2890	A
Potencia Aparente	2000	kVA
Impedancia	0,04	p.u

Tabla 6.6: Datos de placa del transformador de PTAP La Mochita

El sistema de impulsión Cerro Chepe opera mediante dos subsistemas independientes:

- Chepe Concepción: Configuración 3+1 (tres bombas operativas + una en reserva)
- Chepe Talcahuano: Tres bombas operativas.

En conjunto, representan siete unidades de bombeo conectadas a la red eléctrica, con una capacidad máxima de operación simultánea de seis bombas, según la demanda hídrica requerida. Todas las unidades comparten idénticas especificaciones técnicas, según se detalla en la Tabla 6.7.

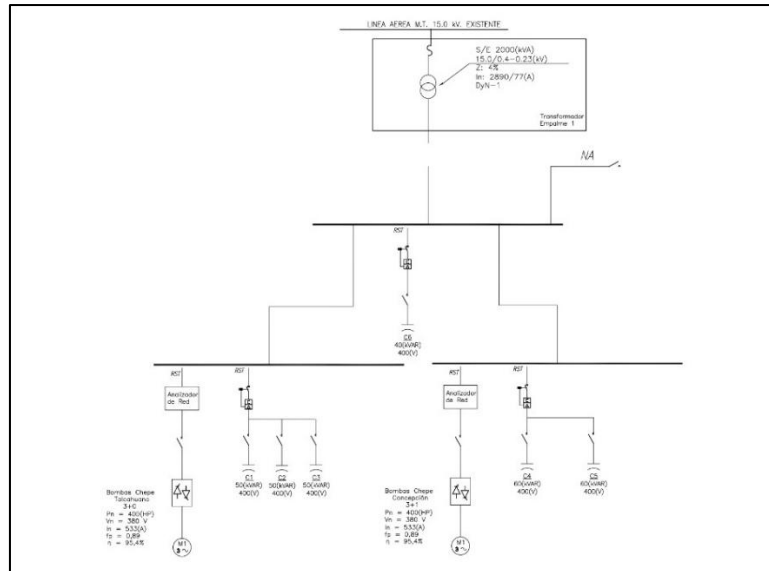


Figura 6.2: Esquema del sistema eléctrico del Empalme 1 de PTAP La Mochita

Todas estas bombas cuentan con partidores suaves encargados de reducir la corriente de partida de las bombas, accionadas mediante un PLC y además de poder accionarse de la sala de control de la planta.

Bomba Elevadora Cerro Chepe		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de Medida
Voltaje	380	V
Corriente	533	A
Potencia Eléctrica	313	kW
Potencia Mecánica	400	HP
Factor de potencia	0,89	
Eficiencia	95,4	%

Tabla 6.7: Valores nominales de la bomba del grupo Chepe

El sistema de compensación de energía reactiva integra bancos de condensadores distribuidos de la siguiente forma:

- 1 unidad de 40 kVAr
- 2 unidades de 60 kVAr
- 3 unidades de 50 kVAr

Estos equipos, cuya disposición física se detalla en la Figura 6.2, proporcionan una capacidad máxima de compensación de 310 kVAr. Todos los condensadores operan con un voltaje nominal estandarizado de 400 V, garantizando compatibilidad con la infraestructura eléctrica existente.

Todas las bombas de Chepe tienen un analizador de red SATEC PM130E, y además hay un analizador de red dedicado para la medición del interruptor general del sistema para ver el consumo total de el empalme 1 que permite determinar los consumos energéticos facturados de este sistema y determinar si tiene problemas con el factor de potencia.

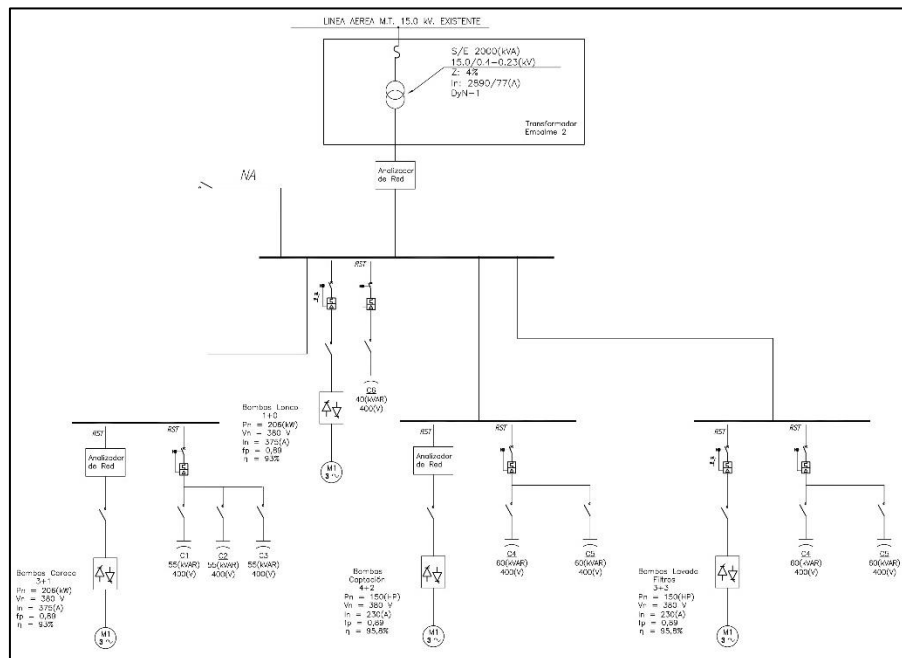


Figura 6.3: Esquema del sistema eléctrico del Empalme 2 de PTAP La Mochita

El proceso de captación cuenta con 6 bombas instaladas todas con las mismas características (Tabla 6.8), incluyendo partidores suaves a excepción de una que se encuentra con un variador de frecuencia. Para el control de agua extraída las 6 bombas rotan para distribuir el desgaste, y solamente operan como máximo 4 bombas en simultaneo, el agua cruda es enviada a los estanques donde pasa por procesos por floculación, decantación, filtración y cloración para hacerla apta para el consumo.

Bomba Captación agua cruda		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de Medida
Voltaje	380	V
Corriente	230	A
Potencia Eléctrica	117	kW
Potencia Mecánica	150	HP
Factor de potencia	0,89	
Eficiencia	95,8	%

Tabla 6.8: Valores nominales de la bomba de captación

El grupo de elevación hacia el estanque Cerro Caracol cuenta con cuatro bombas idénticas (Tabla 6.9), todas equipadas con partidores suaves para su accionamiento. La operación se ajusta dinámicamente según la demanda hídrica, con un máximo de tres bombas funcionando simultáneamente. Para garantizar un desgaste uniforme, las unidades se rotan periódicamente en su ciclo operativo.

Bomba Cerro Caracol		
Parámetro	Valor Nominal	Unidad de media
Voltaje	380	V
Corriente	375	A
Potencia Eléctrica	160,4	kW
Potencia Mecánica	206	HP
Factor de potencia	0,89	
Eficiencia	95,8	%

Tabla 6.9: Valores nominales de la bomba grupo Caracol

La elevación a Lonco solamente opera una bomba de las mismas características que las del grupo Cerro Caracol (Tabla 6.9), también tiene como accionamiento un partidor suave.

El sistema de lavado de filtros opera con un máximo de tres bombas de las seis disponibles, cuyas especificaciones técnicas coinciden con las de captación de agua cruda (Tabla 6.8). Este proceso se programa preferentemente en horario nocturno –periodo de baja demanda– para prevenir

sobrecargas en el transformador, con una duración máxima de operación continua de 3 horas. La frecuencia de lavado se establece en ciclos aproximados de 30 días, aunque este intervalo puede ajustarse según el estado de los filtros y los parámetros de calidad del agua

El sistema de compensación de potencia reactiva del empalme 2 está compuesto por:

- Un banco de condensadores de 3×55 kVAr (165 kVAr)
- Dos bancos de 2×60 kVAr (240 kVAr)
- Un banco de 40 kVAr

Totalizando una capacidad instalada de 445 kVAr. La operación de estos bancos sigue un esquema de compensación segmentada asociado a los grupos de bombeo activos, donde cada conjunto de bombas activa exclusivamente sus bancos asignados durante su funcionamiento, tal como se detalla en la configuración eléctrica presentada en la Figura 6.3.

Este empalme carece de analizadores individuales en cada equipo electromecánico, contando únicamente con tres analizadores de red SATEC PM130E estratégicamente ubicados: uno en el secundario del transformador (para monitoreo del consumo global), y dos adicionales en las barras de los grupos de bombas de captación y Cerro Caracol.

7 Análisis de recintos seleccionados

7.1 Introducción

A partir del diagnóstico general, se seleccionan tres recintos representativos que muestran comportamientos críticos respecto al factor de potencia: PTAP La Mochita, Captación Sanchina 2, y PEAS Lomas de San Andrés 1. En este capítulo se realiza un análisis en profundidad de cada caso, considerando condiciones operativas, configuración eléctrica, compensación instalada y eventos anómalos.

7.2 Consumos eléctricos facturados

La Captación Sanchina opera bajo un contrato tarifario AT4.3, correspondiente a una tarifa horaria en alta tensión para clientes con medición de: energía consumida, demanda máxima de potencia en horas punta, y demanda máxima de potencia suministrada. Esta estructura tarifaria incluye cargos por:

- Demanda máxima suministrada.
- Demanda máxima leída en Hora Punta.
- Consumo de energía.

En la Figura 7.1 se presenta el comportamiento comparativo de energía activa y reactiva de la captación Sanchina 2.

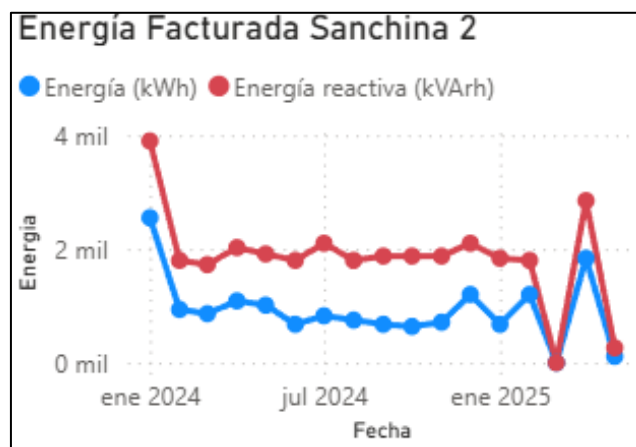
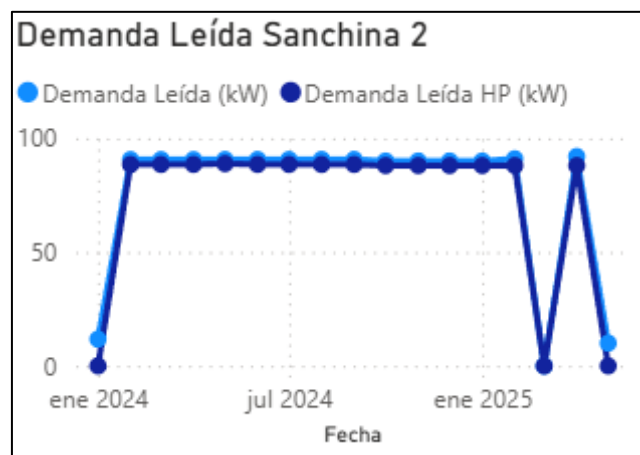


Figura 7.1: Energía Facturada de Captación Sanchina 2

La Figura 7.2 revela un comportamiento anómalo en la Captación Sanchina: desde el año 2024 se registra una demanda máxima constante equivalente a su capacidad instalada completa, pese a reportar producción nula (0 m^3). Esta demanda resulta técnicamente inexplicable en ausencia de operación productiva, ya que el consumo de los sistemas electrónicos (PLC, medidores de caudal y HMI) no supera el 5% de dicha capacidad. El perfil eléctrico sugiere operación a plena carga y los registros hídricos sugieren producción cero. Por lo tanto, existe una discrepancia que requiere investigación inmediata ya sea por fallas en la instrumentación, errores en los reportes operacionales o consumo energético no autorizado.



extremadamente bajo, muy por debajo del mínimo regulatorio de 0,93 establecido por la SEC. Lo más preocupante es que esta condición persiste pese a que la planta se encuentra en operación, lo que demuestra graves deficiencias en la gestión energética.

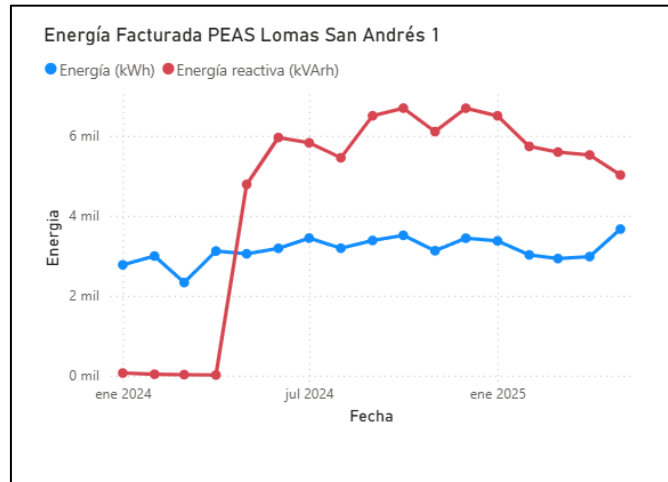
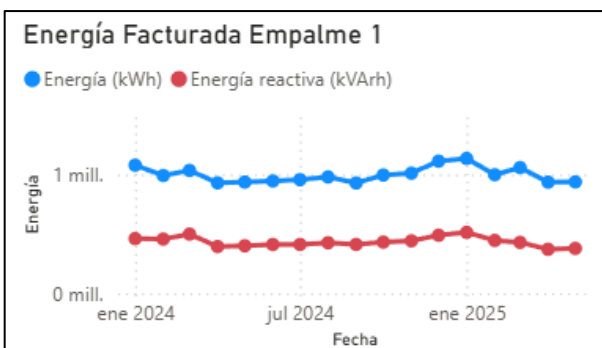
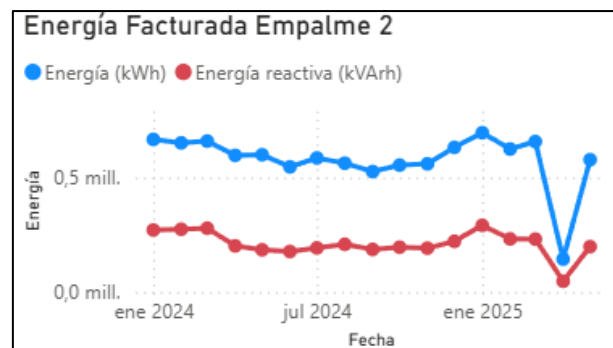


Figura 7.3: Energía facturada de PEAS Lomas San Andrés 1

Para la **PTAP La Mochita**, se optó por tener un régimen como Cliente Libre al cumplir con los requisitos establecidos por el Ministerio de Energía de Chile [48], específicamente al superar ampliamente el umbral mínimo de 300 kW de potencia conectada. Como cliente libre, la planta goza de importantes beneficios comerciales, incluyendo la libertad de contratación directa con generadores y comercializadores en el mercado eléctrico, acceso a tarifas competitivas no reguladas, y flexibilidad en la gestión de su demanda energética. En la figura 7.4 se ve el consumo de energía activa y reactiva de ambos empalmes de PTAP La Mochita.



a)



b)

Figura 7.4: Energía Facturada de PTAP La Mochita

a) Empalme 1 b) Empalme 2

Los registros de demanda de la figura 7.5 muestran un comportamiento consistente donde los valores de demanda máxima en hora punta y hora fuera de punta presentan magnitudes similares durante los meses con cobro por demanda en hora punta (de 18:00 a 22:00 h, entre abril y septiembre en Chile). Esta equivalencia entre ambos indicadores revela que la planta opera cerca de su capacidad máxima, sin realizar un control del consumo en horario punta.

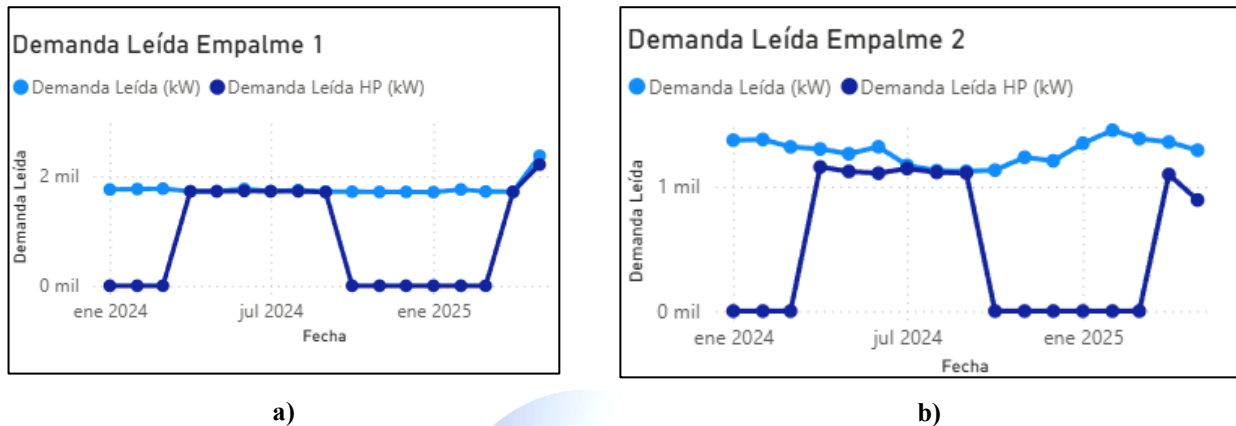


Figura 7.5: Demanda Máxima Leída de PTAP La Mochita

a) Empalme 1 b) Empalme 2

El análisis de los registros de consumo energético en la PTAP La Mochita revela un comportamiento estacional característico, con un aumento aproximado del 10% durante los meses de verano (diciembre a marzo). Este patrón coincide con el aumento esperado en la demanda de agua potable durante el verano. A pesar de mostrar una operación estable sin variaciones bruscas, el sistema presenta un consumo de potencia reactiva que, aunque mantiene proporciones típicas de cargas inductivas ($Q < P$), supera los límites establecidos por la normativa. Esta condición ha generado multas recurrentes por bajo factor de potencia desde enero de 2024 tan cómo se ilustra en la figura 7.6, evidenciando la necesidad de optimizar la compensación reactiva en la planta.

Se observa que el empalme 1 - encargado de alimentar el sistema de elevación Cerro Chepe que abastece a Concepción y Talcahuano - presenta un consumo energético aproximadamente un 20% superior al empalme 2. Esta mayor demanda, unida a la operación continua podría explicar la recurrencia de multas por factor de potencia en este empalme. Las posibles causas incluyen desbalances en la compensación reactiva, estrés térmico en los transformadores y la operación prolongada de bombas en condiciones subóptimas.

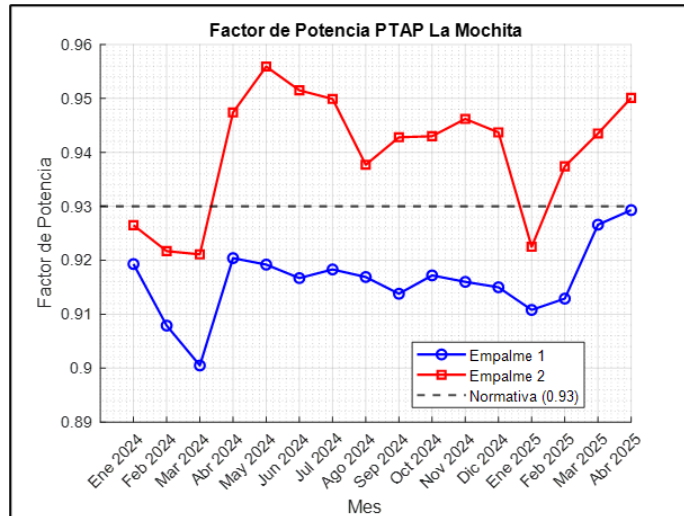


Figura 7.6: Factor de potencia en PTAP La Mochita

La situación descrita hace imperativo un análisis detallado del conjunto de bombas elevadoras del empalme 1, con el objetivo de implementar medidas correctivas que permitan: optimizar el factor de potencia, reducir las pérdidas energéticas y eliminar los costos asociados a multas.

Del tablero creado se extraen los datos de facturación del empalme 1 de PTAP La Mochita, del año 2025 que se tenían disponibles al momento de realizar el estudio (Tabla 7.1).

Fecha	Energía Activa (kWh)	Energía Reactiva (kVArh)	Demanda Máxima Leída (kW)	Demanda Facturada (kW)	Demanda Máxima Leída HP (kW)	Demanda Facturada HP (kW)	Factor de potencia
01-2025	1.135.596	514.842	1.711	1.771	0	1.729	0,911
02-2025	998.696	446.552	1.759	1.771	0	1.729	0,913
03-2025	1.059.096	429.899	1.722	1.763	0	1.729	0,927
04-2025	936.460	372.125	1.720	1.763	1.714,11	1.714	0,929

Tabla 7.1: Consumos energéticos PTAP La Mochita

7.3 Plan de implementación

Dado que el proyecto es un plan piloto, se priorizarán acciones de bajo costo, comenzando por un diagnóstico exhaustivo realizando las siguientes acciones:

- Revisión de datos existentes
- Recopilación de registros históricos de multas por factor de potencia y reportes de operación de los últimos 12 meses.
- Verificación de la existencia de sistemas de monitoreo en tiempo real.
- Evaluación de medición en línea.
- Si no hay datos en línea, se procederá a complementar la información con visitas a terreno.

Con la información recopilada se desarrolla un informe técnico preliminar que establece recomendaciones de optimización de bajo costo, enfocadas en maximizar la rentabilidad operacional.

7.3.1 Captación Sanchina 2

Para garantizar la disponibilidad de datos en tiempo real, se implementó un sistema de comunicación entre el analizador de red y el SCADA corporativo. Esto requirió: la cotización y configuración de un enlace mediante radio entre el analizador y el PLC local, la conexión con el PLC maestro de planta, y la creación de TAGs específicos para cada variable en el SCADA. Esta integración permite el monitoreo continuo y el registro histórico de los parámetros eléctricos.

El analizador de red proporciona mediciones clave para la validación energética: voltajes (línea y fase), corrientes (fase y neutro), frecuencia, factor de potencia, y las tres potencias (activa, reactiva y aparente). Estos datos permiten verificar la existencia de picos de demanda no registrados y comparar el consumo medido con los valores facturados, asegurando la precisión de los registros comerciales y técnicos. La disponibilidad de estas variables en el SCADA facilita el análisis detallado del comportamiento eléctrico de la planta.

El enlace de comunicación entre el analizador de red y el SCADA quedó operativo el 11 de junio de 2025, con registro efectivo de datos a partir del 17 de junio. Este desfase de 6 días en la puesta en marcha, sumado al periodo limitado de operación al momento del estudio, impidió obtener un ciclo

completo de facturación eléctrica para contrastar con las mediciones locales. Como resultado, no fue posible realizar una validación integral entre los datos medidos y los valores facturados durante el desarrollo de esta investigación.

La figura 7.7 muestra el perfil de demanda de la captación Sanchina durante el 1 de julio, registrando un valor máximo de 114 W (20:00 h). Para garantizar la comparabilidad con los datos de la compañía eléctrica, se implementó una metodología de medición basada en intervalos de 15 minutos, registrando la demanda en cada ventana temporal.

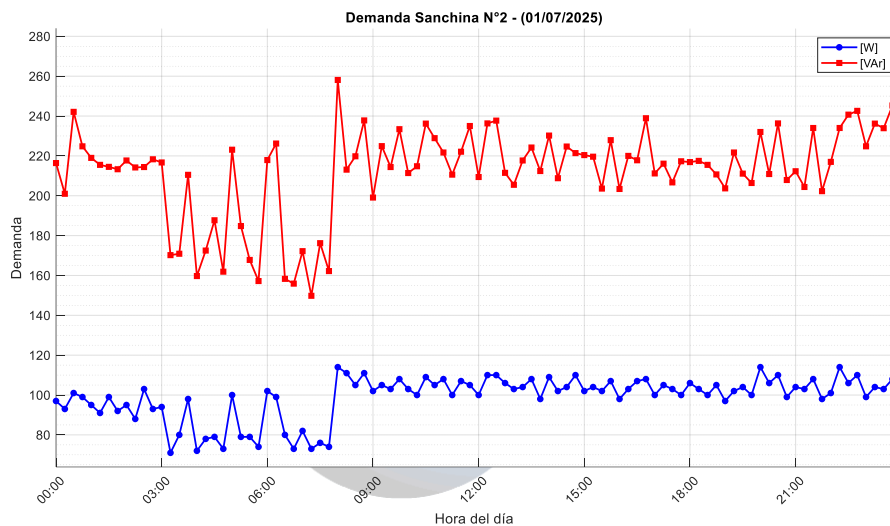


Figura 7.7: Gráfico Demanda de Sanchina N°2 del 1/07/2025

La figura 7.8 y 7.9 muestran los datos de demanda máxima leída y la máxima demanda leída en hora punta registrados por el sistema de medición local. Sin embargo, al contrastar estos valores con los históricos facturados (considerando una demanda máxima típica de 92 kW registrada en meses anteriores), se observa una discrepancia significativa. Durante el periodo de monitoreo completo, el sistema registró un consumo total de 70 kWh, valor que difiere notablemente de los patrones de consumo históricos para esta instalación.

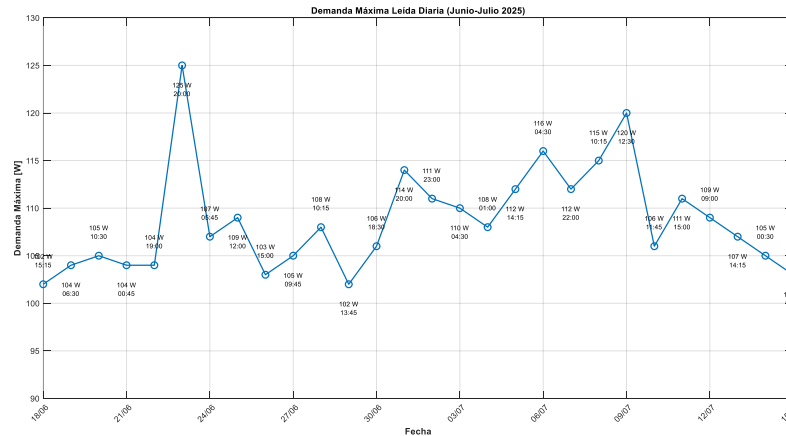


Figura 7.8: Demanda maxima leída diaria por analizador de red Sanchina N°2

Al comparar los datos históricos facturados con el consumo real medido, se evidencia una diferencia significativa en el consumo energético registrado. Particularmente relevante resulta el hecho de que las demandas máximas medidas por la compañía eléctrica (92 kW) coinciden exactamente con la capacidad nominal de la bomba operando a plena carga (93 kW), pero durante el periodo de estudio no se pudo registrar esta demanda máxima.

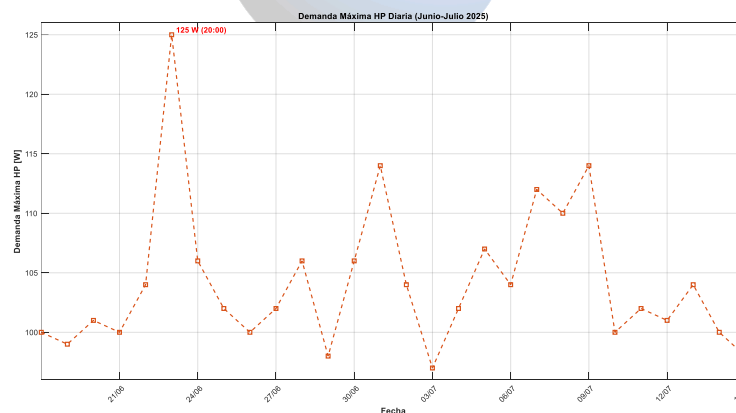


Figura 7.9: Demanda maxima leída diaria en hora punta por analizador de red Sanchina N°2

El análisis comparativo entre el consumo energético total facturado y el consumo base medido durante los periodos de inactividad de la bomba (Tabla 7.2) revela una diferencia significativa. Al considerar que la bomba opera a su capacidad nominal de 93 kW cuando está activa, se puede estimar su tiempo de funcionamiento dividiendo esta diferencia energética por su potencia máxima. Este método de cálculo permite determinar que, para justificar el exceso de consumo registrado en la

facturación, la bomba habría operado 156 horas de operación a plena carga durante el periodo estudiado, cifra que contrasta notablemente con los registros operacionales reportados por la planta.

Fecha	Energía [kWh]	Energía consumida únicamente por la bomba [kWh]	Horas de operación de la Bomba
01-01-2024	2550	2480	26,7
01-02-2024	937	867	9,3
01-03-2024	862	792	8,5
01-04-2024	1087	1017	10,9
01-05-2024	1012	942	10,1
01-06-2024	675	605	6,5
01-07-2024	825	755	8,1
01-08-2024	750	680	7,3
01-09-2024	675	605	6,5
01-10-2024	637	567	6,1
01-11-2024	712	642	6,9
01-12-2024	1200	1130	12,2
01-01-2025	675	605	6,5
01-02-2025	1200	1130	12,2
01-03-2025	918,5	848,5	9,1
01-04-2025	918,5	848,5	9,1
Total	15634	14514	156

Tabla 7.2: Cálculo de las horas de funcionamiento estimadas

Como parte de la investigación, se ejecutaron pruebas en terreno para validar el comportamiento real de la bomba. Inicialmente, se inspeccionó el sistema de automatización y los protocolos de operación, identificando mediante entrevistas con el personal que la bomba solo se activaba brevemente para labores de mantenimiento. Esta información, contrastada con las discrepancias en el horómetro, confirmó que las mediciones de demanda coincidían con los valores registrados.

Adicionalmente, se comprobó que el agua era desviada a un desagüe mediante un sistema de válvulas, lo que explicaba la falta de registro en la producción. Para un análisis completo, se realizaron pruebas comparativas con la bomba en operación: primero con los bancos de condensadores (Tabla 7.3) y luego sin los condensadores (Tabla 7.4).

Mediciones de Sanchina 2 con Condensador			
Medición	Fase a	Fase b	Fase c
Voltaje de fase (V_{LN})	233 [V]	235 [V]	238 [V]
Corriente (A)	187 [A]	175 [A]	172 [A]
Potencia Activa (P)	32,15[kW]	30,8[kW]	27,98[kW]
Potencia Reactiva (Q)	30,26[kVAr]	28,03[kVAr]	29,17[kVAr]
Potencia Aparente (S)	44,5[kVA]	41,2[kVA]	40,3[kVA]
Cos ϕ	0,844 (c)	0,896 (c)	0,823 (c)
Factor de Potencia (PF)	0,733 (c)	0,736 (c)	0,697(c)
Angulo de desfase (ϕ)	-33,0°	-27,1°	-33,9°
THD _v	6,8%	7,3%	7,4%
THD _i	55,5%	69,0%	65,3%

Tabla 7.3: Medición realizada en Sanchina N°2 con banco de condensadores energizado.

Los datos presentados fueron obtenidos directamente del analizador de red EMpro instalado en la planta. Este equipo proporciona mediciones precisas de potencia activa y reactiva, permitiendo un análisis detallado del comportamiento eléctrico del sistema. Al evaluar el ángulo de desfase (ϕ), se observa que, con los bancos de condensadores desconectados, el sistema presenta un factor de potencia cercano a unitario en la fundamental. Esta característica es consistente con el accionamiento mediante variador de frecuencia, cuyo circuito inversor introduce un desfase controlado entre tensión y corriente para satisfacer los requerimientos de la carga.

El variador de frecuencia instalado (tipo 6 pulsos) introduce distorsión armónica en la red eléctrica, aunque se mantiene dentro de los límites especificados por el fabricante ($THD_v < 5\%$) [44] siempre que los bancos de condensadores permanezcan desconectados. Este comportamiento demuestra que la distorsión generada por el VDF, si bien es significativa, resulta manejable en condiciones operativas normales sin compensación reactiva activa.

Mediciones de Sanchina 2 sin Condensador			
Medición	Fase a	Fase b	Fase c
Voltaje de fase (V_{LN})	233,3 [V]	230,5 [V]	230,5 [V]
Corriente (A)	153,5 [A]	154 [A]	134,7 [A]
Potencia Activa (P)	32,36[kW]	30,16[kW]	27,79[kW]
Potencia Reactiva (Q)	15,37[kVAr]	16,53[kVAr]	15,44[kVAr]
Potencia Aparente (S)	35,9[kVA]	35,4[kVA]	30,9[kVA]
Cos ϕ	0,996 (i)	0,975 (i)	0,982 (i)
Factor de Potencia (PF)	0,904 (i)	0,869 (i)	0,877(i)
Angulo de desfase (ϕ)	3,1°	14,5°	8,7°
THDv	3,2%	3,4%	3,2%
THDi	46,1%	49,2%	51,4%

Tabla 7.4: Medición realizada en Sanchina N°2 sin banco de condensadores.

Un hallazgo crítico es que el sistema opera con activación simultánea de la bomba y el banco de condensadores. Sin embargo, al contrastar los estados operativos, se observa que la presencia de los condensadores empeora la calidad de la energía. Este fenómeno se confirma al calcular la potencia reactiva fundamental por fase, donde se evidencia que la energía reactiva producida por la fundamental es igual a la energía reactiva que suministran los condensadores.

El cálculo demuestra que el banco de condensadores genera una compensación reactiva total de $Q_T = -60,24$ [kVAr]. Esta cifra coincide con la energía reactiva capacitiva medida, confirmando que el banco es la fuente principal de dicha compensación. Por lo tanto, es necesario desconectar este banco para corregir el factor de potencia, ya que el sistema actualmente está sobrecompensado (FP capacitivo).

Se recomienda evitar la operación con estos bancos de condensadores debido a tres factores críticos:

1. Los altos niveles de distorsión armónica total.
2. El riesgo de resonancia entre la inductancia del sistema y la capacitancia instalada
3. El empeoramiento de la calidad de energía observado durante su operación.

Estos hallazgos técnicos sustentan la decisión de mantener los bancos fuera de servicio, priorizando así la estabilidad del sistema eléctrico sobre la compensación reactiva. La presencia simultánea de armónicos elevados y posible resonancia representa un riesgo operativo que justifica esta medida preventiva.

Para la Captación Sanchina, se propone implementar una gestión estratégica del horario punta (18:00-22:00, entre abril y septiembre), con el objetivo de reducir los costos asociados al consumo energético durante este período de tarificación elevada. El análisis demuestra que al reubicar las operaciones de mantenimiento y el funcionamiento de la bomba fuera de este intervalo crítico, se podría disminuir significativamente la demanda máxima registrada en hora punta. Esta medida generaría un ahorro estimado de \$9,6 millones anuales, derivado tanto de la reducción en los cargos por demanda en hora punta como de la minimización de penalizaciones por factor de potencia (debido a que multa se aplica al total neto de la boleta). La implementación de esta estrategia, complementada con las recomendaciones técnicas previas, permitiría optimizar la eficiencia operacional y los costos energéticos de la instalación.

7.3.2 PEAS Lomas de San Andrés 1

Actualmente, la planta no cuenta con equipos de compensación de energía reactiva, lo que incumple la normativa vigente sobre factor de potencia. Para optimizar la operación, se recomienda instalar un banco de condensadores que permita cumplir con los requisitos técnicos y reducir costos operativos.

La bomba principal tiene una potencia de 11 kW y opera con un factor de potencia de 0,81, lo que genera un consumo de energía reactiva. Según los cálculos técnicos, se requiere un banco de condensadores de 5 kVAr para elevar el factor de potencia a 0,96, superando el mínimo exigido por la normativa chilena. Esta mejora reducirá las multas por bajo factor de potencia generando un posible ahorro de \$1.963.000 en un año al no tener el recargo por FP, además de optimizar la eficiencia energética del sistema.

Para garantizar un funcionamiento adecuado, se propone implementar un sistema de control automático que active el banco de condensadores junto con la bomba, asegurando un factor de

potencia dentro del rango normativo. Asimismo, se deben incorporar protecciones eléctricas básicas, como un interruptor contra cortocircuitos.

Se detectó que la bomba consume más energía reactiva que activa, lo que sugiere que esta ópera cerca de condiciones de vacío. Esto indica un posible error en su selección inicial. Dado que la Planta Elevadora de Aguas Servidas carece de mediciones de nivel y caudal, no es posible confirmar si trabaja dentro de sus parámetros de diseño. Por ello, se recomienda:

1. **Instalar un sensor de caudal** para monitorear la carga hídrica y determinar si la bomba está sobredimensionada.
2. **Evaluar el reemplazo de la bomba** por una unidad adecuada a las necesidades reales de la planta, mejorando así la eficiencia energética y evitando futuras penalizaciones.

Cabe destacar que, si se realiza un cambio de bomba en el futuro, será necesario recalcular la potencia reactiva requerida, ya que las características técnicas del nuevo equipo (potencia, eficiencia y factor de potencia nominal) modificarán los parámetros de compensación necesarios.

7.3.3 PTAP La Mochita

Durante los meses de enero a abril, se registraron multas por factor de potencia debido a que los valores medidos estuvieron por debajo del mínimo exigido por la normativa técnica. Aunque la planta cuenta con analizadores de red conectados al sistema SCADA como parte de un proyecto piloto, estos no están integrados al telecontrol ni son visibles en el centro de operaciones. Sin embargo, los dispositivos sí almacenan datos históricos del empalme correspondiente a la elevación de Chepe. Al procesar y consolidar esta información, se obtuvieron los presentes en la tabla 7.5.

Mes	Energía Activa (kWh)	Energía reactiva (kVarh)	Demanda máxima leída (kW)	Fecha de lectura de la demanda máxima	Factor de potencia
Enero	1.135.580	514.921	1710	06/01/25 11:00	0,9105
Febrero	997.368	446.433	1759	26/02/25 10:15	0,9125
Marzo	1.058.990	430.247	1724	11/03/25 20:00	0,9262
Abril	943.5136	375.167	1723	14/04/25 15:30	0,9290

Tabla 7.5: Consumos energéticos PTAP La Mochita obtenidos del analizador de red local

Los datos recopilados presentan un margen de error inferior al 1% al compararlos con los registros de facturación de demanda y energía. Adicionalmente, se realiza una validación cruzada entre las mediciones horarias de la compañía distribuidora y los datos propios correspondientes a los meses de marzo y abril. El análisis arroja un error promedio de 0,55% para marzo y abril, lo que confirma la confiabilidad de las mediciones como representación fiel del comportamiento del sistema.

Los datos operacionales registrados en la figura 7.10 revelan patrones de uso similares entre los grupos de bombeo de Chepe Talcahuano y Chepe Concepción, aunque con diferencias significativas en su configuración:

1. Chepe Talcahuano:

- Opera con un máximo de 3 bombas simultáneas
- Muestra una distribución equilibrada del tiempo de operación entre unidades

2. Chepe Concepción:

- Funciona en configuración 3+1 (tres bombas activas más una de reserva)
- Presenta una bomba con menor uso, destinada principalmente para rotación de equipos

El consumo energético promedio de ambos grupos resulta comparable, ya que su esquema operacional responde a demandas equivalentes. Sin embargo, las variaciones en el número de bombas activas en cada momento generan fluctuaciones en los consumos específicos, lo que explica las diferencias puntuales registradas en los datos de operación.

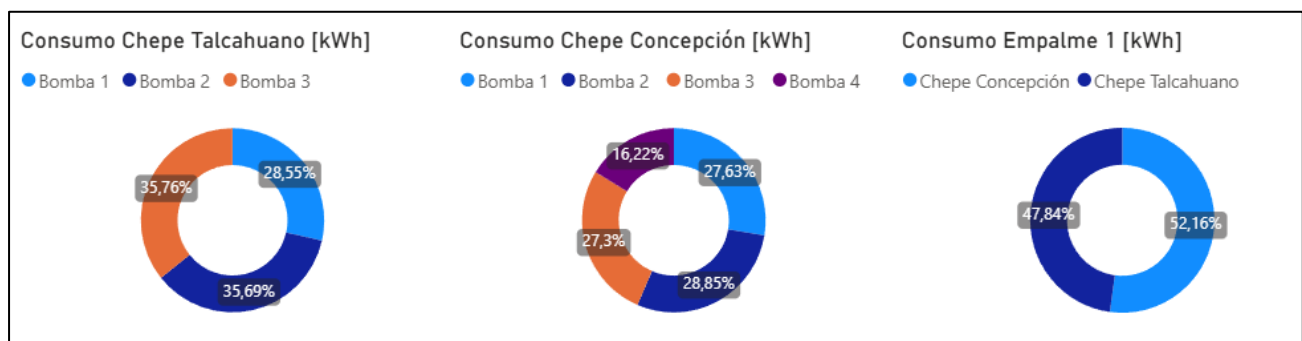


Figura 7.10: Energía Consumida por los grupos de bomba

Durante el período de cuatro meses evaluado, se observa una proporción constante en el consumo energético entre las diferentes bombas, manteniéndose patrones similares en su distribución porcentual mes a mes. Paralelamente, se registraron los datos de caudal de los grupos Chepe

Talcahuano y Chepe Concepción (Tabla 7.6), los cuales fueron convertidos a metros cúbicos (m³) para correlacionar el volumen de agua elevada con los períodos de facturación eléctrica correspondientes. Este análisis permitió establecer una relación directa entre el consumo energético y la producción hídrica durante el intervalo estudiado.

Fecha	Volumen Chepe Concepción (m ³)	Volumen Chepe Talcahuano (m ³)	Volumen Total de Chepe (m ³)
01-01-2025	2.048.421	1.771.289	3.819.710
01-02-2025	1.919.279	1.703.897	3.623.176
01-03-2025	1.886.825	1.495.576	3.382.401
01-04-2025	1.662.939	1.534.025	3.196.964

Tabla 7.6: Volumen de agua elevada por grupo Chepe

El análisis revela una correlación directa entre los mayores volúmenes de agua elevada y el deterioro del factor de potencia, observándose que durante los meses de máxima producción los valores de FP descendían significativamente. Para investigar este fenómeno, se seleccionó específicamente el día con el mayor volumen registrado (9 de enero), donde la operación en condiciones de sobrecarga de las bombas generaba un incremento en la demanda de potencia reactiva, lo que explica el peor desempeño del factor de potencia durante estos períodos de alta producción. Este hallazgo sustenta la hipótesis de que la capacidad de compensación reactiva actual resulta insuficiente cuando el sistema opera cerca de su máxima capacidad.

El estudio de las curvas de demanda de los grupos de bombeo (Figura 7.11) reveló que el grupo Chepe operó durante gran parte del periodo a su máxima capacidad.

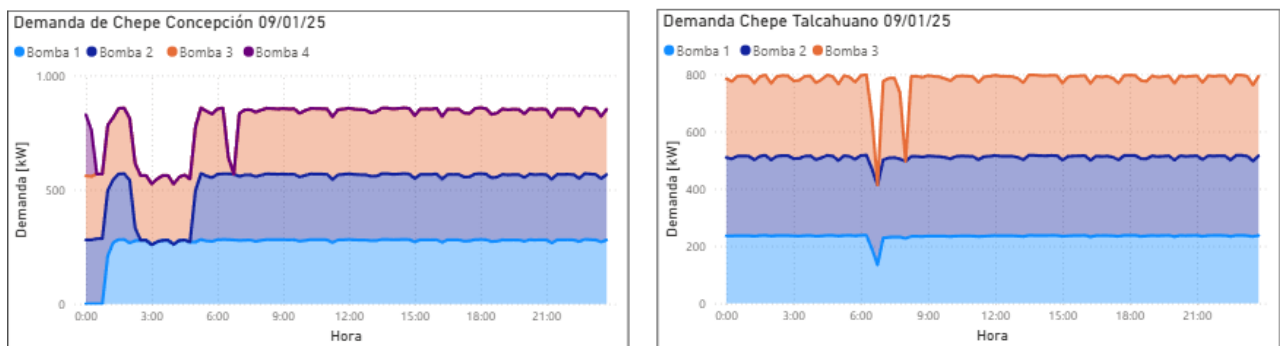


Figura 7.11: Demanda del grupo Chepe del 09/01/25

El análisis de la Figura 7.12 revela que el sistema de compensación actual opera en su límite técnico. Sin embargo, los datos muestran que durante el día de máxima demanda el FP descendió a 0,913 (dos puntos bajo el mínimo regulatorio de 0,93), situación que, de prolongarse, generaría multas recurrentes. Este patrón se repitió consistentemente durante todo el período de estudio, demostrando que la capacidad de compensación existente resulta insuficiente para mantener el cumplimiento normativo en condiciones de operación extendida a plena carga, requiriendo una revisión urgente del sistema para evitar sanciones y garantizar la eficiencia energética continua.

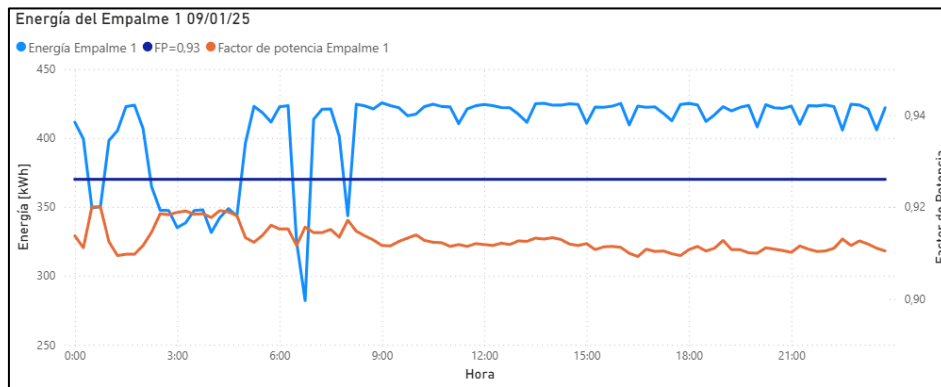


Figura 7.12: Energía del Empalme 1 del 09/01/25

Para evaluar el desempeño del sistema de compensación durante el 9 de enero, se siguió la siguiente metodología: Se determina la energía activa y reactiva promedio de cada bomba durante el período de máxima demanda (09:00 h a 18:00h) en intervalos de 15 minutos, obteniendo el factor de potencia individual de cada unidad. Los valores individuales se suman para obtener el consumo total del empalme 1, contrastando estos resultados con las mediciones del analizador de red instalado en el tablero general. Esta comparación permitió cuantificar con precisión la energía reactiva total generada por el conjunto de bombas y la energía reactiva compensada.

Nombre Bomba	Energía (kWh)	Energía reactiva (kVArh)	Factor de potencia
Bomba 1 Chepe Concepción	71,14	35,93	0,893
Bomba 2 Chepe Concepción	71,75	36,75	0,890
Bomba 3 Chepe Concepción	71,55	36,14	0,892
Bomba 1 Chepe Talcahuano	58,96	31,83	0,879
Bomba 2 Chepe Talcahuano	71,02	35,96	0,890
Bomba 3 Chepe Talcahuano	70,05	35,37	0,890
Total	414,47	211,98	0,890

Tabla 7.7: Consumo promedio de energía activa y reactiva de las bombas

Los datos tabulados muestran que, cuando operan las seis bombas simultáneamente, la planta presenta consumo promedio de 414,47 kWh con un factor de potencia de 0,89. Sin embargo, según las mediciones del analizador de red en el empalme 1, el FP es 0,914, lo que indica que el sistema actual de compensación está aportando 47,88 kVAr de potencia reactiva capacitiva.

No obstante, para cumplir con el mínimo regulatorio de 0,93 establecido por la SEC, se requiere una compensación adicional de 80,92 kVAr. Dado que el sistema actual no logra cubrir este déficit, se evidencia una insuficiencia en la compensación reactiva durante condiciones de carga máxima.

Para garantizar el cumplimiento normativo y evitar penalizaciones, se propone la instalación adicional de un banco de condensadores de 100 kVAr al sistema existente, esta medida permitiría:

- Mantener el FP por encima de 0,93 incluso en operación con las seis bombas.
- Reducir el riesgo de multas por incumplimiento de la normativa SEC.
- Optimizar la eficiencia energética en el sistema.

Esta solución se justifica porque, proporciona un margen de seguridad operativa suficiente para cubrir fluctuaciones de carga sin incurrir en sobrecompensación.

La bomba 1 del grupo Chepe Talcahuano presenta indicadores de posible ineficiencia operativa, manifestados en tres aspectos clave: (1) opera con una potencia media un 26% inferior a su valor nominal, (2) tiene un factor de potencia reducido (promedio de 0,879) y (3) genera un caudal significativamente menor al estándar del sistema, especialmente en modo individual (Figura 7.13). Estas anomalías persisten a pesar de no presentar obstrucciones físicas aparentes que justifiquen la reducción de rendimiento, lo que sugiere la existencia de otros factores que afectan su eficiencia energética e hidráulica. Este comportamiento diferencial respecto a las demás unidades del sistema requiere una investigación técnica exhaustiva para determinar las causas fundamentales de su bajo desempeño.

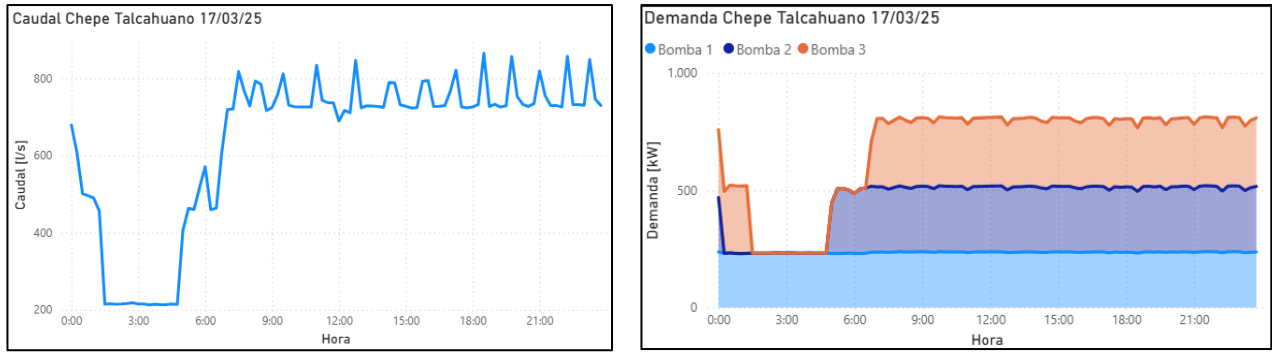


Figura 7.13: Caudal Chepe Talcahuano del 17/03/25

Dado que solo se cuenta con un sensor de caudal instalado a la salida de cada grupo de bombas (y no en cada bomba individualmente), los valores registrados en la tabla 7.8 se obtuvieron mediante un protocolo de medición secuencial. Para cada grupo (Chepe Concepción y Chepe Talcahuano), se busca un momento, donde esté en funcionamiento una única bomba, asegurando que las demás estén fuera de operación, y se registró el caudal medido por el sensor común.

Nombre Bomba	Caudal promedio (l/s)	Día medido
Bomba 1 Chepe Concepción	287	14/04/25
Bomba 2 Chepe Concepción	298	09/03/25
Bomba 3 Chepe Concepción	299	10/03/25
Bomba 4 Chepe Concepción	291	03/04/25
Bomba 1 Chepe Talcahuano	216	17/03/25
Bomba 2 Chepe Talcahuano	286	27/03/25
Bomba 3 Chepe Talcahuano	296	14/03/25

Tabla 7.8: Caudal promedio de las bombas de Chepe

Como medida para garantizar el cumplimiento de la normativa de eficiencia energética, se recomienda integrar los datos del sistema SCADA en una plataforma de visualización en tiempo real accesible para los operadores. Esta implementación permitiría: monitorear continuamente el desempeño de las bombas, detectar oportunamente pérdidas de eficiencia operacional, y anticipar caídas en el factor de potencia.

8 Conclusiones

8.1 Comentarios

El análisis realizado reveló problemas críticos en la gestión energética de Essbio, destacando inconsistencias operacionales y deficiencias técnicas significativas. En la Captación Sanchina se detectó un consumo energético equivalente a la capacidad nominal de la planta sin producción real de agua, generando multas injustificadas. Casos como la PTAP La Mochita y la PEAS Lomas de San Andrés evidencian sistemas de compensación reactiva mal dimensionados o ausentes. Estos hallazgos reflejan la necesidad urgente de implementar sistemas de monitoreo continuo que permitan detectar anomalías y optimizar el consumo energético en tiempo real.

Además, el estudio identifica oportunidades concretas de mejora, como la reubicación de actividades de mantenimiento fuera del horario punta en la Captación Sanchina, lo que generaría un ahorro estimado de \$9,6 millones anuales. La implementación de bancos de condensadores adecuados en plantas críticas no solo aseguraría el cumplimiento normativo, sino que mejoraría la eficiencia energética global. Estas medidas, combinadas con un enfoque preventivo en la gestión energética, podrían transformar sustancialmente el desempeño operacional de Essbio, reduciendo costos y mejorando su competitividad en el sector sanitario.

Cabe destacar que los resultados no solo exponen limitaciones técnicas, sino también oportunidades de mejora en la gestión energética. La implementación de las soluciones propuestas (monitoreo en tiempo real, ajuste de compensación y mantenimiento predictivo) no solo mitigaría las multas por bajo factor de potencia, sino que también optimizaría la eficiencia operacional, reduciendo pérdidas energéticas y prolongando la vida útil de los equipos.

8.2 Conclusiones

A lo largo de este estudio, se logró evidenciar la calidad de la energía en las instalaciones de Essbio mediante la evaluación de parámetros clave como el factor de potencia, la distorsión armónica total y el consumo de energía reactiva, los cuales son indicadores críticos de la eficiencia y estabilidad de los sistemas eléctricos. El factor de potencia, en particular, está directamente asociado a la calidad de la energía, ya que un FP bajo refleja un uso ineficiente de la infraestructura eléctrica, generando

pérdidas energéticas, sobrecargas en los equipos y penalizaciones económicas. Además, la presencia de armónicos en la compensación reactiva afecta la integridad de la red, dañando equipos sensibles y reduciendo la vida útil de los componentes.

El estudio cumplió con los objetivos planteados al inicio. En primer lugar, se identificaron los recintos críticos mediante un polinomio de priorización que consideró la magnitud de las multas, su frecuencia, la desviación del FP y la criticidad operativa. Esto permitió focalizar el análisis en plantas como PTAP La Mochita, Captación Sanchina 2 y PEAS Lomas de San Andrés 1. En segundo lugar, se determinaron las causas principales del bajo FP, las que fueron compensación insuficiente, sistemas sobre compensados y la distorsión armónica en instalaciones con variadores de frecuencia. Finalmente, se propusieron estrategias de mitigación basadas en cálculos y mediciones, asegurando que las soluciones fueran técnicas y económicamente viables.

En el caso de PTAP La Mochita, se confirmó mediante análisis de datos históricos y mediciones locales que el empalme 1, correspondiente a las bombas de elevación de Cerro Chepe, concentra el mayor consumo energético de la planta y registra factores de potencia marginales, especialmente durante condiciones de operación máxima. Se identificó que la compensación actual es menor a los 310 kVAr que debería tener, recomendándose la instalación de al menos 100 kVAr adicionales para garantizar un FP superior a 0,93 incluso en escenarios de alta demanda. Además, se detectó que una de las bombas del grupo Chepe Talcahuano presentaba ineficiencias en su operación, evidenciadas por un bajo caudal impulsado, menor potencia activa y FP promedio de 0,879, lo cual podría indicar desgaste o problemas mecánicos no detectados.

En la Captación Sanchina 2, el análisis reveló que, pese a no estar produciendo agua, mantenía un consumo constante de energía activa y reactiva, lo que resulta en multas elevadas injustificadas. Gracias a la integración de un sistema de comunicaciones entre el analizador de red EMpro y el PLC local, se habilitó el monitoreo remoto de la planta desde el SCADA de la compañía, lo que permite desde ahora detectar anomalías en tiempo real. Este caso demuestra la importancia de contar con monitoreo continuo incluso en instalaciones aparentemente inactivas, dado que los costos asociados a un mal FP pueden mantenerse si no se hacen acciones correctivas.

Respecto a la PEAS Lomas de San Andrés 1, se constató que no cuenta con ningún sistema de compensación de energía reactiva, a pesar de operar con dos bombas de 11 kW con régimen 1+1. Desde abril de 2024, esta planta presenta consumos de energía reactiva superiores a la activa, situación que genera \$1,96 millones en penalizaciones por FP. Además, su configuración de partida directa genera arranques de alto impacto en la red eléctrica. Se propone la instalación de bancos de condensadores adecuados y la implementación de partidores suaves para mitigar el estrés en la red durante el arranque. La ausencia de compensación reactiva resultó en un FP de 0,57, por lo que se recomendó un banco de 5 kVAr, con un ahorro estimado de \$1,96 millones anuales en multas.

La metodología de priorización desarrollada basada en un polinomio que pondera: magnitud de multas, permanencia de incumplimientos, desviación del FP, y criticidad operativa permitió identificar, dentro de los 1,300 clientes analizados, los recintos con mayor impacto económico y técnico. Los resultados cuantitativos demostraron que estas instalaciones concentraban el 12% de las multas totales por bajo FP. Esta selección estratégica, sustentada en datos cuantitativos logro proyectar un ahorro potencial de \$22,15 millones anuales al eliminar las penalizaciones por FP en las plantas estudiadas.

Complementariamente, se desarrolló una herramienta de análisis en Power BI basada en la base de datos de facturación eléctrica de Essbio y Nuevosur, con integración de información de procesos y ubicación geográfica. Esta herramienta permite generar mapas de calor, alertas por FP, y visualizar tendencias energéticas por tipo de proceso y zona geográfica. Gracias a esto se identificó que las zonas más afectadas por multas son Concepción, Rancagua y Coronel, donde se recomienda focalizar los esfuerzos correctivos y preventivos en materia de calidad de energía. Los datos levantados demostraron que más del 16% de las instalaciones analizadas presentan multas por bajo FP, siendo estas mayoritariamente plantas con bajo nivel de supervisión, clientes regulados y sin sistemas de medición avanzados. Esto refuerza la necesidad de avanzar hacia una infraestructura inteligente, con mayor integración de sistemas SCADA, medidores con protocolo de comunicación y una estrategia proactiva de mantenimiento predictivo.

Se recomienda que Essbio avance hacia una gestión energética centralizada, con apoyo de sistemas analíticos y monitoreo remoto. Estas medidas no solo permitirán cumplir con la normativa vigente, sino que también representan una oportunidad real de reducir costos operacionales, mejorar la confiabilidad del suministro y avanzar hacia objetivos de sostenibilidad energética.

8.3 Trabajos futuros

Unas posibles áreas de trabajo y nuevas investigaciones pueden ser:

Ampliación del estudio a más instalaciones: Este trabajo se centró en tres recintos seleccionados como plan piloto, lo que permitió aplicar en profundidad la metodología propuesta. Sin embargo, se recomienda extender el análisis a una mayor cantidad de instalaciones, especialmente aquellas que presentan multas intermitentes, operan bajo regímenes variables de carga y a plantas que no cuentan con equipamiento de medición moderno. Una base de estudio más amplia permitiría validar la herramienta de priorización desarrollada y consolidar patrones de comportamiento eléctrico comunes en las distintas zonas operativas de la empresa.

Integración total de medidores al sistema SCADA: Uno de los principales desafíos identificados fue la falta de visibilidad remota de los parámetros eléctricos y su dificultad para comunicarlos con el sistema SCADA y la falta de equipos de medición en muchas plantas. Se recomienda avanzar hacia la integración de todos los analizadores de red a los sistemas SCADA locales y centrales para las plantas más grandes de la compañía. La habilitación de protocolos estandarizados de comunicación y el desarrollo de dashboards operativos en tiempo real para operadores, mantenimiento y gestión energética puesto a que el actual propuesto no es dinámico y solo permite responder ante la multa y no adelantarse a la multa por lo que un dashboard dinámico permitiría un monitoreo preventivo y automatizado del factor de potencia, reduciendo significativamente los tiempos de reacción ante condiciones anómalas.

Modelación y simulación de distorsión armónica: El estudio actual reconoció la presencia potencial de armónicos, pero no se realizaron campañas completas de medición ni modelación. Se recomienda como trabajo futuro que se realicen análisis espectral en terreno utilizando instrumentos con capacidad FFT y THD detallado e idealmente simular condiciones de resonancia considerando

los parámetros reales de bancos y transformadores para determinar posibles oportunidades de mejora como la implementación de filtros activos para evitar resonancia, proteger los bancos de condensadores y mejorar la calidad del suministro.

Capacitación y cultura energética: Se detectó que muchas plantas con problemas de FP son operadas sin personal en terreno o con escasa capacitación en eficiencia energética. Como complemento a las soluciones técnicas, se sugiere desarrollar manuales operativos con protocolos de revisión del FP y realizar capacitaciones a operadores y mantenedores en el impacto técnico del mal FP y la importancia de la gestión de hora punta de las plantas.



Bibliografía

- [1] Y. Kabir, Y. M. Mohsin and M. M. Khan, "Automated power factor correction and energy monitoring system," in 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Coimbatore, India, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118009.
- [2] D. Stet, A. M. Kulkarni, J. R. Smith y L. P. García, "Power Factor Correction Using EMTP-RV for Engineering Education," 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPEC.2019.8893477.
- [3] D. P. Mishra, S. P. Padhi, B. Pati and H. Mohapatra, "Power Factor Improvement Using Noble Techniques," in 2024 3rd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON), Bhubaneswar, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ODICON62106.2024.10797605.
- [4] A. Zoghbi and D. Berkani, "FPGA in the loop implementation of an adaptive-filtering based control of shunt active power filter," in 2020 IEEE 7th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICETAS51660.2020.9484223.
- [5] M. B. Khan and M. Owais, "Automatic power factor correction unit," in 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube), Quetta, Pakistan, 2016, pp. 283-288, doi: 10.1109/ICECUBE.2016.7495239.
- [6] R. L. de Araujo Ribeiro, C. C. de Azevedo and R. M. de Sousa, "A Robust Adaptive Control Strategy of Active Power Filters for Power-Factor Correction, Harmonic Compensation, and Balancing of Nonlinear Loads," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, pp. 718-730, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2161334.
- [7] L. Astudillo-Mora, A. Vásquez-Vega and J. Rojas-Serrano, "Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia," Científica, vol. 20, no. 1, pp. 3-11, 2016.
- [8] P. Thananukul and Y. Kamsuwan, "Active Power Filter in Linear Systems for Power Factor Correction," in 2021 3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Shanghai, China, 2021, pp. 12-16, doi: 10.1109/SPIES52282.2021.9633893.
- [9] V. M. López-Martín, F. J. Azcondo and A. Pigazo, "Power Quality Enhancement in Residential Smart Grids Through Power Factor Correction Stages," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 11, pp. 8553-8564, Nov. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2813965.
- [10] J. Chen, X. Zhang and C. Wen, "Harmonics Attenuation and Power Factor Correction of a More Electric Aircraft Power Grid Using Active Power Filter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 12, pp. 7310-7319, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2590990.

- [11] J. Chen, X. Zhang and C. Wen, "Harmonics Attenuation and Power Factor Correction of a More Electric Aircraft Power Grid Using Active Power Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 12, pp. 7310-7319, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2590990.
- [12] M. Mangaraj, A. K. Panda and T. Penthia, "Supercapacitor supported DSTATCOM for harmonic reduction and power factor correction," in 2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509275.
- [13] S. Cetin, "Power-Factor-Corrected and Fully Soft-Switched PWM Boost Converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3508-3517, July-Aug. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2821101.
- [14] A. Mallik, B. Faulkner and A. Khaligh, "Control of a single-stage three-phase boost power factor correction rectifier," in 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 2016, pp. 54-59, doi: 10.1109/APEC.2016.7467851.
- [15] C. L. Frutos Cabrera and R. C. Lotero, "Compensación reactiva en sistemas eléctricos industriales con presencia de armónicos," *FPUNE Scientific*, vol. 12, no. 1, pp. 1-15, Mar. 2019.
- [16] P. Rojas, Optimización del sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en la Unidad Minera Chungar e Islay, B.S. thesis, Univ. Continental, Huancayo, Perú, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8432>
- [17] Y. Prasetyo, A. Wijayanto, D. C. Riawan and M. Ashari, "Power factor correction using programmable logic control based rotary method," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, p. 012045, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012045.
- [18] V. S. Acosta, Estudio para la implementación de bancos de condensadores con fin de ahorro energético en la embotelladora "Don Carlos S.A." - Chiclayo, B.S. thesis, Univ. Nac. Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/7853>
- [19] A. Alzakkar, N. Mestnikov and I. Valeev, "Harmonics and their impact in determining the method of reactive power compensation in electrical grids," in 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111955.
- [20] P. A. Blasco, R. García-Roger, J. M. Espí and E. Pérez-Soler, "Algorithm for passive reactive power compensation of an unbalanced three-phase four-wire system using capacitors ensuring minimum line losses," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 227, p. 109972, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109972.
- [21] A. Yani, S. Suharyanto, Y. I. Mandang y I. M. A. Artana, "Optimum reactive power to improve power factor in industry using genetic algorithm," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 751-757, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v14.i2.pp751-757.

- [22] A. Panchbhai, S. Parmar and N. Prajapati, "Shunt active filter for harmonic and reactive power compensation using p-q theory," in 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 2017, pp. 260-264, doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081097.
- [23] Chile, Ley N° 21.305: Sobre eficiencia energética, 2021. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile>
- [24] F. J. Oyanguren Ramírez, Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva, B.S. thesis, Univ. Nac. del Callao, Callao, Perú, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/12345>
- [25] S. C. Ferreira, R. A. Modesto, S. A. Mussa y A. S. e Silva, "Finite Control Set Model Predictive Control for Dynamic Reactive Power Compensation With Hybrid Active Power Filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 3, pp. 2608-2617, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2740819.
- [26] D. I. Panfilov, M. G. Astashev, A. V. Zharkov y P. S. Filippov, "Performance Assessment of Thyristors Switched Capacitors during Reactive Power Compensation of Dynamic Load," 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, Russia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571426.
- [27] E. C. Robles Meza, Propuesta de diseño e instalación de un banco automático de condensadores para reducir la potencia reactiva en la subestación del SENATI - Huancayo, B.S. thesis, Univ. Continental, Huancayo, Perú, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/7452>
- [28] S. Dahat, A. R. Chavan, P. K. Hiwase y R. M. Moharil, "A novel harmonic filter to enhance power quality through THD reduction and power factor correction," 2024 2nd World Conference on Communication & Computing (WCONF), Raipur, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCONF61366.2024.10692022.
- [29] C. H. López Lalangui, Corrección de factor de potencia mediante un estudio de energía en una fábrica de tubos en la ciudad de Tabacundo, B.S. thesis, Univ. Tecnol. Indoamérica, Quito, Ecuador, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/3421>
- [30] L. A. Cujilán Intriago, Ubicación óptima de banco de capacitores mediante un modelo matemático de programación no lineal entera mixta para un sistema eléctrico de potencia de 13 barras de la IEEE, B.S. thesis, Univ. Téc. Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3073>
- [31] A. S. Freire, J. M. López, D. P. Ortiz y L. G. Ramírez, "Implementación de control remoto para la apertura y cierre de compensación reactiva al alimentador de 13,8 kV de la subestación eléctrica de la empresa Novacero S.A. mediante una tarjeta ADVC-IOEX," Rev. Téc. "energía", vol. 21, no. 1, pp. 84-93, 2024, doi: 10.37116/revistaenergia.v21.n1.2024.659.
- [32] H. E. Hidalgo Monar and S. W. Matamoros Plaza, Diseño de un sistema de compensación reactiva para distribución con filtros armónicos, B.S. thesis, Univ. Politéc. Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27446>

- [33] H. Dirik, C. Gezezin and H. S. Dirik, "Reactive power compensation with hybrid compensator combining a synchronous motor and switched capacitors," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 216, p. 109010, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.109010.
- [34] C. Roy, D. Chatterjee and T. Bhattacharya, "Control of a Hybrid Shunt FACTS Compensator for Voltage Collapse Prevention in Interconnected EHV Power Transmission Systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Ind. Electron.*, vol. 4, no. 2, pp. 538-548, April 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2023.3244739.
- [35] P. K. Saurav, S. Mansani and P. Kayal, "Multi-objective planning for optimal location, sizing, and power factor of distributed generators with capacitor banks in unbalanced power distribution networks," *Electr. Eng.*, 2024, doi: 10.1007/s00202-024-02612-4.
- [36] R. Fan, L. Wang, Y. Li y H. Tanaka, "Overview of power factor calculation method for nonsinusoidal and unbalanced systems," *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 12, pp. 1763-1771, 2023, doi: 10.1002/tee.23909.
- [37] R. Dhote, R. J. Satputaley and S. Manmadharao, "Power Factor Correction by Phase Angle Regulation using Multi Level Inverter based DVR," in *2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, Raipur, India, 2024, pp. 651-656, doi: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474898.
- [38] J. L. Gomez Enrique and N. E. Sanchez Calvay, *Metodología de regresión lineal con Machine Learning para la compensación de la energía reactiva en instalaciones industriales*, B.S. thesis, Univ. Nac. San Agustín, Arequipa, Perú, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/149930>
- [39] A. Azad, "Performance Analysis of Different Power Factor Correction Topologies," in *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kamand, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724620.
- [40] A. Tovbaev, G. Boynazarov and I. Togaev, "Improving the quality of electricity using the application of reactive power sources," *E3S Web Conf.*, vol. 429, p. 06032, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202339006032.
- [41] Ministerio de Energía, Decreto Supremo N° 12T que modifica el Decreto Supremo N° 11T, de 2016, sobre fórmulas tarifarias para clientes regulados, Santiago, Chile, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1152808>.
- [42] Ministerio de Energía, Decreto Supremo N° 11T que fija fórmulas tarifarias aplicables a clientes regulados del sistema eléctrico nacional, Santiago, Chile, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1116460>.
- [43] Comisión Nacional de Energía, Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución Eléctrica, Santiago, Chile, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.cl/normativa>.
- [44] Schneider Electric, *ATV930/950 Installation Manual*, Manual del usuario, NHA80932, versión 11, jul. 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.se.com>.

[45] Phoenix Contact, Medidor de energía EEM-MA770*. (s.f.). [En línea]. Disponible: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/medidor-de-energia-eem-ma770-2907945>. (último acceso: 06 ago. 2025).

[46] N. Villaroel, “Mal Factor de Potencia Essbio-Nuevosur 01-2025,” Email enviado a A. Vera, 27 Febrero 2025.

[47] SATEC, PM130+ Power Quality Meter – Technical Data, SATEC, [En línea]. Disponible: <https://www.satec-global.com/products/pm130-plus/?activeTab=data>. (último acceso: 06 ago. 2025).

[48] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Guía Indicativa: Principales consideraciones sobre el cambio de régimen de cliente regulado a libre, Santiago de Chile, 2025. [En línea]. Disponible: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia-documentos-libres.pdf>.

[49] N. Villaroel, “Metodología actual Correcciones mal factor de potencia,” Email enviado a J. Arias, 11 Octubre 2025.

[50] Essbio, "Nuestros Procesos I: Producción de Agua Potable," Subgerencia de Confiabilidad, Chile, 2022.

[51] Essbio, Tratamiento de Aguas Servidas, Programa de Competencias Técnicas, Chile, Oct. 2019.



Anexo A.

Producción de agua potable [50]

La producción de agua potable consiste en una serie de etapas diseñadas para transformar agua cruda en un recurso apto para el consumo humano, cumpliendo con normas de calidad y seguridad. El proceso inicia con la captación del agua, la cual puede ser superficial (ríos, lagos) o subterránea (pozos, drenes), dependiendo de la disponibilidad y características de la fuente. Una vez captada, el agua cruda pasa por un pretratamiento para eliminar sólidos gruesos y sedimentos mediante rejas y desarenadores.

Posteriormente, el agua es sometida a procesos de coagulación y floculación, donde se añaden químicos como sulfato de aluminio o cloruro férrico para aglomerar partículas suspendidas. Estas partículas se separan en la etapa de decantación, donde los flóculos sedimentan por gravedad. A continuación, el agua clarificada pasa por filtración, ya sea rápida o lenta, para remover partículas más finas. La desinfección es una etapa crítica, donde se aplican agentes como cloro, ozono o luz ultravioleta para eliminar microorganismos patógenos, asegurando la inocuidad del agua. Finalmente, el agua tratada se almacena en estanques elevados o semienterrados, desde donde se distribuye a la red de abastecimiento.

Durante todo el proceso, se realizan controles operacionales y de calidad para garantizar el cumplimiento de normativas, como la NCh409 en Chile, que establece requisitos microbiológicos, químicos y organolépticos. El mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones es esencial para asegurar la continuidad y eficiencia del servicio, abordando desafíos como el estrés hídrico y la gestión sostenible de los recursos.

Tratamiento de agua servida [51]

El tratamiento de aguas servidas consiste en una serie de etapas diseñadas para eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos, con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente. El proceso inicia con la recolección del agua residual a través de redes de alcantarillado, que es transportada a plantas de tratamiento mediante estaciones elevadoras. La primera etapa es el pre-tratamiento, donde se retienen sólidos gruesos (rejas), arenas (desarenadores) y grasas (desengrasadores) para evitar daños en equipos posteriores.

En el tratamiento primario, se realiza la sedimentación de sólidos suspendidos mediante decantadores, reduciendo la carga orgánica. La etapa clave es el tratamiento secundario, donde microorganismos (lodos activados) degradan la materia orgánica en reactores biológicos con suministro de oxígeno. Los flóculos formados se separan en clarificadores, y el lodo excedente se purga para su tratamiento posterior.

El tratamiento terciario (opcional) remueve nutrientes como nitrógeno y fósforo mediante procesos biológicos o químicos. Finalmente, la desinfección con cloro, ozono o luz ultravioleta elimina patógenos antes de verter el efluente a cuerpos receptores, cumpliendo normativas como el DS 90 en Chile. Los lodos residuales se espesan, deshidratan (filtros prensa, centrífugas) y estabilizan (digestión aeróbica/anaeróbica) para su disposición segura según el DS 4.

Entre los desafíos operacionales destacan la gestión de espumas, sobrecargas hidráulicas y la eficiencia energética. Las tendencias actuales incluyen la cogeneración de energía a partir de biogás, la reutilización de aguas tratadas para riego y la implementación de tecnologías sostenibles como humedales artificiales.

Fotografías de mediciones en terreno en Sanchina N°2



Figura A 1: Voltaje de fase Sanchina N°2 prueba sin condensador.

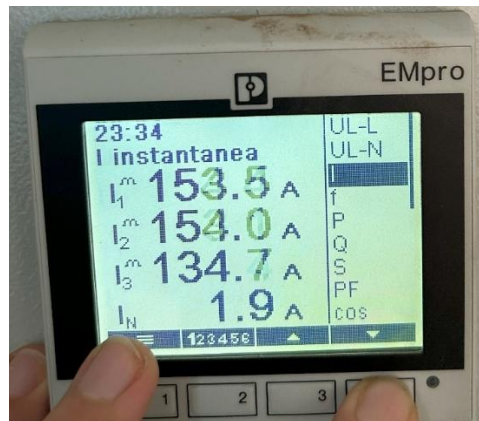


Figura A 2: Corriente de fase Sanchina N°2 prueba sin condensador.



Figura A 3: Potencia activa Sanchina N°2 prueba sin condensador.

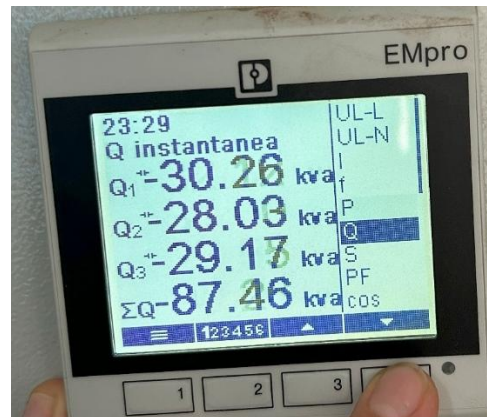


Figura A 4: Potencia reactiva Sanchina N°2 prueba con condensador



Figura A 5: Potencia reactiva Sanchina N°2 prueba sin condensador

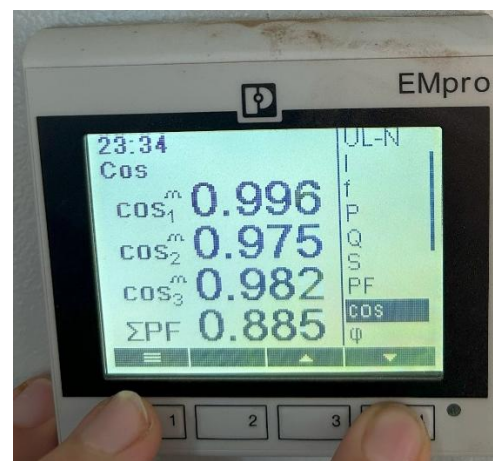


Figura A 6: cos(φ) Sanchina N°2 prueba sin condensador

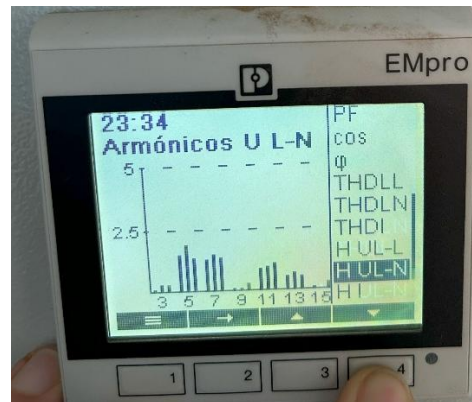


Figura A 7: Espectro Armónico de Voltaje sin condensador

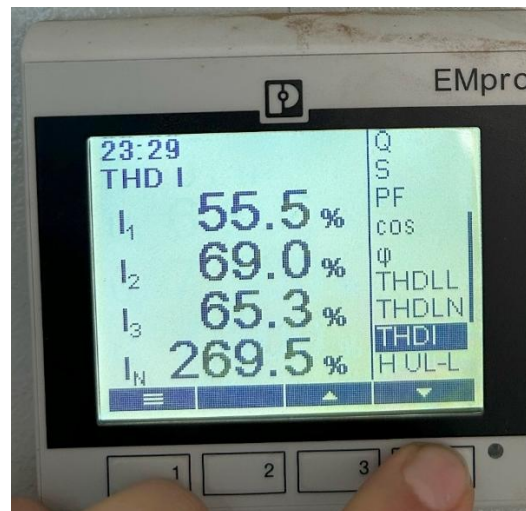


Figura A 8: Distorsión Armónica Total de Corriente Sanchina N°2 prueba con condensador

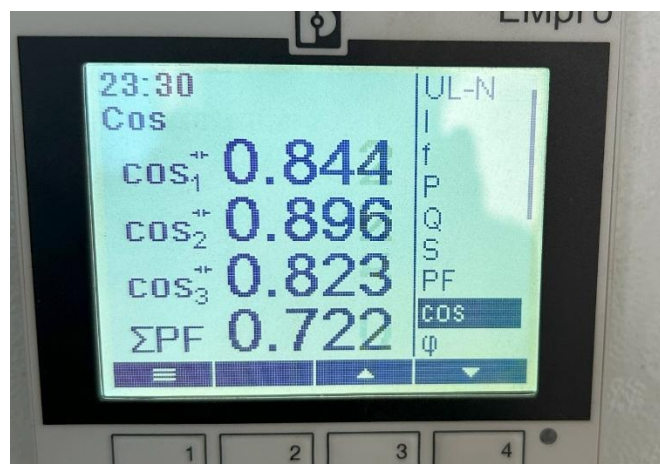


Figura A 9: $\cos(\phi)$ Sanchina N°2 prueba sin condensador

Fotografías de mediciones en PEAS Lomas de San Andrés 1

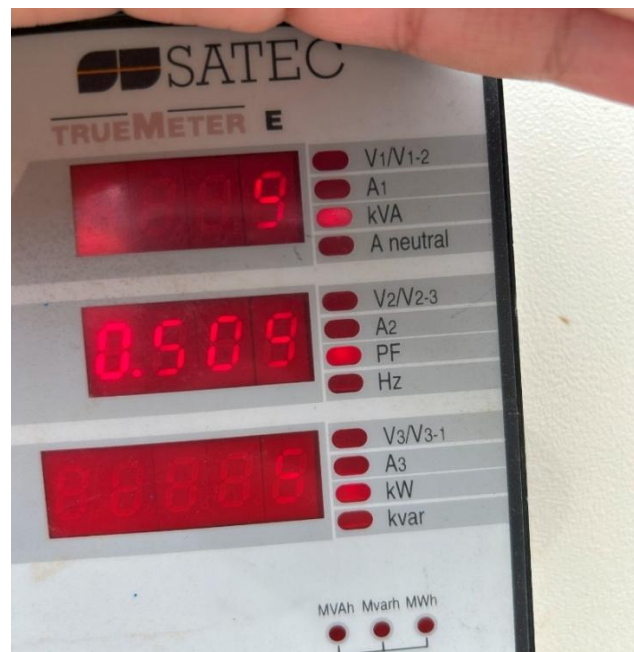


Figura A 10: Potencia Aparente y FP de PEAS Lomas de San Andrés 1



Figura A 11: Corrientes de fase PEAS Lomas de San Andrés 1

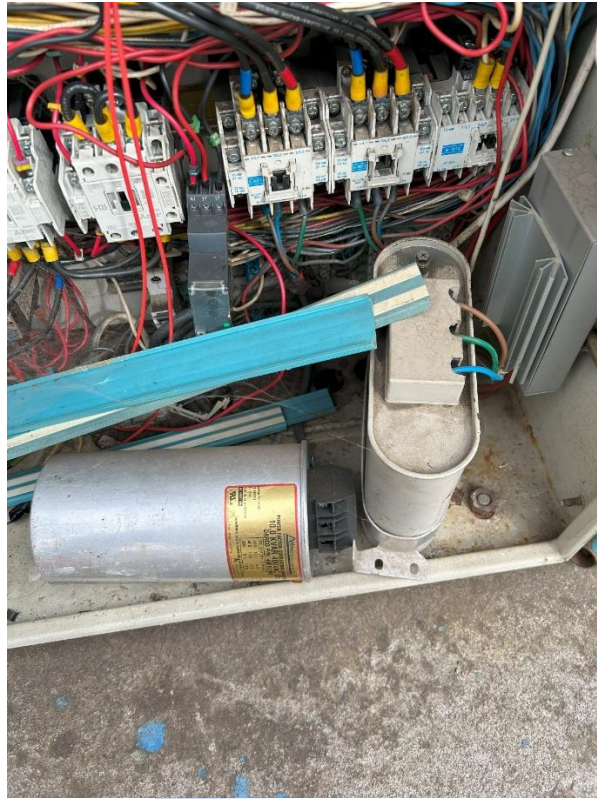


Figura A 12: Condensador desconectado de PEAS Lomas de San Andrés 1

Fotografías de PTAP La Mochita



Figura A 13: Datos de placa de bomba de elevación de Cerro Chepe



Figura A 14: Datos de placa bomba captación PTAP La Mochita



Figura A 15: Grupo de bombas Cerro Chepe



Figura A 16: Grupo de bombas captación

Fórmulas utilizadas en Power BI

Polinomio de priorización

- Medida = $(\text{DIVIDE}(\text{SUM}(\text{'Sheet 1' [Recargo FP ($)]}), 2941864, 0) * 0.4 + 0.3 * (\text{SUM}(\text{'Sheet 1' [Cantidad de multas FP]}) / 15) + 0.2 * \text{DIVIDE}(\text{SUM}(\text{'Sheet 1' [Recargo FP ($)]}), \text{SUM}(\text{'Sheet 1' [Total Neto ($)]}), 0) + \text{MAX}(\text{'Sheet 1' [Critico]}) * 0.1$
- Critico = $\text{IF}(\text{'Sheet 1' [Infraestructura.PROCESO.1]} = \text{"Recoleccion AS"}, 1, 0) + \text{IF}(\text{'Sheet 1' [Infraestructura.PROCESO.1]} = \text{"Produccion AP"}, 1, 0)$

Compensación adicional

- Energía Reactiva Empalme 1 con compensacion extra = $\text{Chepe}[\text{Energía Aparente Empalme 1}] * \text{SIN}(\text{ACOS}(\text{Chepe}[\text{Factor de potencia empalme 1}])) - 100 / 4$

Formula cantidad de clientes con multa

Recintos con Multa FP =

```
VAR RecintosMultados =
    FILTER(
        SUMMARIZE(
            'Sheet 1',
            'Sheet 1' [# Cliente],
            "TotalMulta", SUM('Sheet 1' [Recargo FP ($) ])
        ),
        [TotalMulta] > 0
    )
RETURN
COUNTROWS(RecintosMultados)
```

Extracto de la tabla de validación de datos de PTAP La Mochita

Fecha	Medición local	Medición ENEL	Error absoluto
01-03-2025 0:00	1392,04428	1391,34	0,051%
01-03-2025 0:15	1393,73691	1393,89	0,011%
01-03-2025 0:30	1391,53288	1392,88	0,097%
01-03-2025 0:45	1311,93475	1315,74	0,289%

01-03-2025 1:00	1374,49873	1380,84	0,459%
01-03-2025 1:15	1322,18325	1280,96	3,218%
01-03-2025 1:30	1089,97247	1089,65	0,030%
01-03-2025 1:45	1087,27891	1086,94	0,031%
01-03-2025 2:00	861,230328	895,441	3,821%
01-03-2025 2:15	813,472469	812,053	0,175%
01-03-2025 2:30	809,01325	809,175	0,020%
01-03-2025 2:45	807,825734	807,253	0,071%
01-03-2025 3:00	806,566172	806,066	0,062%
01-03-2025 3:15	807,866469	808,4	0,066%
01-03-2025 3:30	808,425375	807,281	0,142%
01-03-2025 3:45	807,125828	808,24	0,138%
01-03-2025 4:00	807,965813	807,164	0,099%
01-03-2025 4:15	807,077288	807,71	0,078%
01-03-2025 4:30	808,713538	807,586	0,140%
01-03-2025 4:45	808,414859	808,567	0,019%
01-03-2025 5:00	864,835025	899,934	3,900%
01-03-2025 5:15	1093,72895	1094,07	0,031%
01-03-2025 5:30	1093,6311	1094	0,034%
01-03-2025 5:45	1093,5753	1093,14	0,040%
01-03-2025 6:00	1041,02458	1039,75	0,123%
01-03-2025 6:15	1038,88956	1040,56	0,161%
01-03-2025 6:30	1101,04888	1100,57	0,044%
01-03-2025 6:45	1101,7963	1101,76	0,003%
01-03-2025 7:00	1096,7736	1096,68	0,009%
01-03-2025 7:15	1097,63541	1096,5	0,104%
01-03-2025 7:30	1101,23995	1099,69	0,141%
01-03-2025 7:45	1085,26058	1080,8	0,413%
01-03-2025 8:00	1050,03356	1051,4	0,130%
01-03-2025 8:15	1108,54918	1107,38	0,106%
01-03-2025 8:30	1109,46818	1108,46	0,091%
01-03-2025 8:45	1415,53233	1415,35	0,013%
01-03-2025 9:00	1390,40731	1389,35	0,076%
01-03-2025 9:15	1346,40613	1341,42	0,372%
01-03-2025 9:30	1356,6891	1361,36	0,343%
01-03-2025 9:45	1403,08433	1403,13	0,003%
01-03-2025 10:00	1398,02378	1398,82	0,057%
01-03-2025 10:15	1406,99608	1405,14	0,132%
01-03-2025 10:30	1354,54123	1359,55	0,368%
01-03-2025 10:45	1362,19995	1353,89	0,614%
01-03-2025 11:00	1409,72247	1409,33	0,028%
01-03-2025 11:15	1407,16163	1409,4	0,159%
01-03-2025 11:30	1406,6562	1407,4	0,053%
01-03-2025 11:45	1525,17745	1506,3	1,253%

01-03-2025 12:00	1711,9949	1712,37	0,022%
01-03-2025 12:15	1714,43703	1716,72	0,133%
01-03-2025 12:30	1703,71233	1705,92	0,129%
01-03-2025 12:45	1636,26672	1641,18	0,299%
01-03-2025 13:00	1712,702	1713,89	0,069%
01-03-2025 13:15	1706,7306	1704,85	0,110%
01-03-2025 13:30	1712,37893	1711,34	0,061%
01-03-2025 13:45	1712,053	1712,86	0,047%
01-03-2025 14:00	1650,75448	1647,42	0,202%
01-03-2025 14:15	1703,69783	1703,93	0,014%
01-03-2025 14:30	1713,50663	1713,98	0,028%
01-03-2025 14:45	1709,75323	1710,79	0,061%
01-03-2025 15:00	1706,54253	1709,1	0,150%
01-03-2025 15:15	1671,84994	1665,17	0,401%
01-03-2025 15:30	1667,0473	1673,3	0,374%
01-03-2025 15:45	1711,4946	1710,21	0,075%
01-03-2025 16:00	1701,01765	1700,45	0,033%
01-03-2025 16:15	1703,41685	1703,07	0,020%
01-03-2025 16:30	1679,02403	1680,09	0,063%
01-03-2025 16:45	1654,79238	1653,62	0,071%
01-03-2025 17:00	1711,81738	1711,45	0,021%
01-03-2025 17:15	1707,54213	1708,11	0,033%
01-03-2025 17:30	1704,75593	1705,73	0,057%
01-03-2025 17:45	1643,19718	1648,61	0,328%
01-03-2025 18:00	1694,62868	1689,45	0,307%
01-03-2025 18:15	1717,13138	1718,43	0,076%
01-03-2025 18:30	1513,89218	1526,04	0,796%
01-03-2025 18:45	1417,80385	1422,29	0,315%
01-03-2025 19:00	1470,78925	1470,31	0,033%
01-03-2025 19:15	1457,41038	1457,77	0,025%
01-03-2025 19:30	1453,58188	1453,38	0,014%
01-03-2025 19:45	1458,6191	1457,86	0,052%
01-03-2025 20:00	1394,71428	1401,8	0,505%
01-03-2025 20:15	1438,5946	1428,57	0,702%
01-03-2025 20:30	1465,23638	1462,21	0,207%
01-03-2025 20:45	1460,18378	1461,13	0,065%
01-03-2025 21:00	1467,1764	1460,19	0,478%
01-03-2025 21:15	1161,47173	1161,82	0,030%
01-03-2025 21:30	1156,66955	1156,95	0,024%
01-03-2025 21:45	1158,6353	1158,28	0,031%
01-03-2025 22:00	1158,59648	1157,84	0,065%
01-03-2025 22:15	1158,2193	1157,48	0,064%
01-03-2025 22:30	1085,2274	1083,9	0,122%
01-03-2025 22:45	1115,28085	1117,9	0,234%

01-03-2025 23:00	1159,10828	1159,67	0,048%
01-03-2025 23:15	1158,4837	1158,46	0,002%
01-03-2025 23:30	1158,11798	1158,15	0,003%
01-03-2025 23:45	1161,421	1161,21	0,018%
02-03-2025 0:00	1161,83618	1162,33	0,042%

Tabla A 1: Extracto de la tabla de validación de datos de PTAP La Mochita

PTAP La Mochita con el banco de condensadores propuesto

Factor de Potencia Empalme 1 09/01/25

● FP=0,93 ● FP Empalme 1 con Compensación extra ● FP Empalme

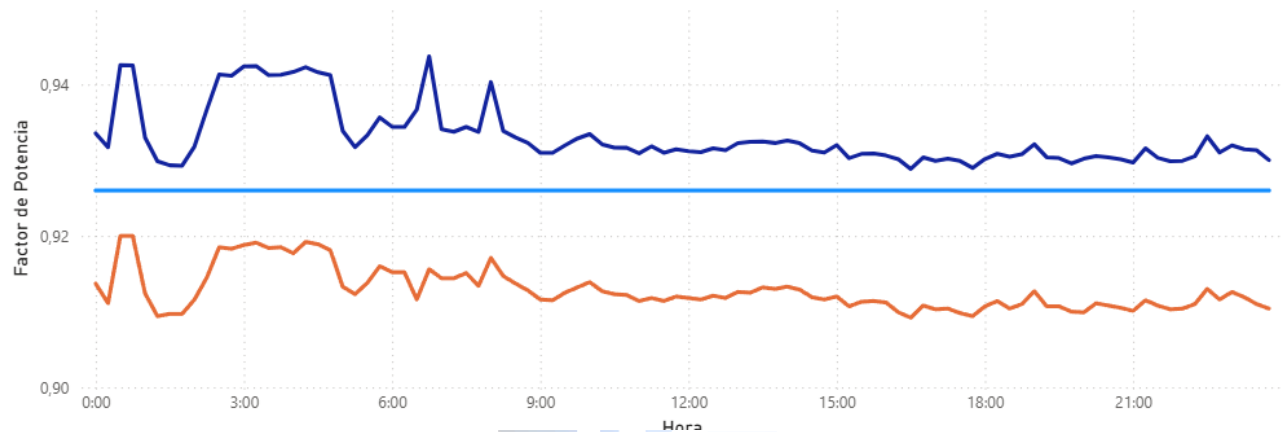


Figura A 17: Factor de potencia con la compensación propuesta 09/01/25

Mes	Energía Reactiva sin Compensación Extra (kVAr)	Energía Reactiva con Compensación Extra (kVAr)	Factor de Potencia sin Compensación Extra (kVAr)	Factor de Potencia con Compensación Extra (kVAr)
Enero	514.921	440.521	0,9105	0,9323
Febrero	446.433	379.233	0,9125	0,9347
Marzo	430.247	355.847	0,9262	0,9479
Abril	375.167	303.167	0,9291	0,9452

Tabla A 2: Energía reactiva y factor de potencia con la compensación propuesta en PTAP La Mochita

Cálculo de la potencia reactiva de la fundamental en Sanchina N°2, con el condensador energizado.

$$Q_a = 233 \cdot 187 \cdot \sin(-33^\circ) = -23,73 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_b = 235 \cdot 175 \cdot \sin(-27,1^\circ) = -18,73 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_c = 238 \cdot 134 \cdot \sin(-33,9^\circ) = -17,78 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c = -60,24 \text{ [kVAr]}$$

