

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y
Computación**

Análisis comparativo de motores imanes permanentes y jaula
de ardilla para aireación en camaroneras

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

Magister en Sistemas Eléctricos de Potencia

Presentado por:

Ing. Kevin José Hidalgo Guachambo

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2025

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, elevo mi gratitud a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y la fuente de sabiduría a lo largo de este camino y de toda mi vida. Su luz ha iluminado cada paso de este proceso académico.

Mi más profunda gratitud para con mi familia, con mención especial a mis padres, José Hidalgo y Violeta Guachambo, por ser mi refugio y mi motivación. Gracias por enseñarme que la humildad y el anhelo de mejorar son las verdaderas claves para triunfar en la vida.

Su confianza total en mí, me dieron la fuerza para no rendirme, incluso en los momentos más difíciles.

A la Universidad ESPOL, al tutor Ph.D Luis Ugarte Vega y profesores de Posgrado por su predisposición permanente e incondicional y por sus profundos conocimientos brindados durante todo el periodo de nuestro proyecto.

Ing. Kevin José Hidalgo Guachambo

DEDICATORIA

A todas las personas que, de una u otra forma, han contribuido y dejado una huella en mi vida durante este periodo de formación.

Así también a mis padres, **José Hidalgo y Violeta Guachambo**, pilares fundamentales de mi vida. Les dedico este logro, fruto de su amor incondicional, sus sacrificios y su fe inquebrantable en mí. Su apoyo constante en cada etapa, en cada duda y en cada triunfo, ha sido el motor que me impulsó a culminar esta meta. Gracias por ser mi ejemplo de perseverancia.

Ing. Kevin José Hidalgo Guachambo

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo **Kevin José Hidalgo Guachambo** acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 de enero del 2026.

Ing. Kevin José Hidalgo Guachambo

COMITÉ EVALUADOR

Ph.D. Luis Fernando Ugarte Vega
PROFESOR TUTOR

Mgr. Jocelyne Selena Salgado Ochoa
PROFESOR REVISOR

RESUMEN

La acuicultura es un pilar fundamental alimentaria de la economía ecuatoriana, en la provincia del Guayas, las camaroneras son el corazón de los procesos productivos que tiene la industria, pero existe un aspecto crítico que es la aireación de las piscinas donde habitan la producción del camarón, en la cual depende de costosos y contaminantes motores diésel. Es por eso que es necesario una migración hacia sistemas de aireación eléctrica en la cual representa una oportunidad estratégica para mejorar la eficiencia, reducir costos operativos y disminuir la contaminación ambiental.

Este proyecto se enfoca en un problema tecnológico en esta migración: el impacto de la elección del motor eléctrico en la calidad y confiabilidad del suministro de energía. El estudio se centra en una camaronera del Guayas donde se han implementado dos tecnologías de vanguardia: los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM) y los motores síncronos de imanes permanentes (PM). A pesar de la eficiencia anunciada de los motores PM, se han presentado fallas recurrentes en componentes eléctricos, como bancos de capacitores y transformadores.

El estudio concluye con un análisis tecno-económico comparativo que evalúa cuatro alternativas. Los resultados demuestran que existe una solución que sea más eficiente y confiable que las demás, además se proporciona un marco metodológico y conclusiones técnicas fundamentadas para guiar la toma de decisiones en la modernización eléctrica del sector acuícola, priorizando la confiabilidad del sistema y la sostenibilidad económica a largo plazo.

ABSTRACT

Aquaculture is a fundamental pillar of the Ecuadorian economy. In the province of Guayas, shrimp farms are at the heart of the industry's production processes, but there is a critical issue: the aeration of the ponds where the shrimp are farmed, which depends on expensive and polluting diesel engines. This is why a migration to electric aeration systems is necessary, representing a strategic opportunity to improve efficiency, reduce operating costs, and decrease environmental pollution.

This project focuses on a technological problem in this migration: the impact of the choice of electric motor on the quality and reliability of the power supply. The study focuses on a shrimp farm in Guayas where two cutting-edge technologies have been implemented: squirrel cage induction motors (SCIM) and permanent magnet synchronous motors (PM). Despite the advertised efficiency of PM motors, there have been recurring failures in electrical components, such as capacitor banks and transformers.

The study concludes with a comparative technical-economic analysis evaluating four alternatives. The results show that there is one solution that is more efficient and reliable than the others. It also provides a methodological framework and well-founded technical conclusions to guide decision-making in the electrical modernization of the aquaculture sector, prioritizing system reliability and long-term economic sustainability.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
DECLARACIÓN EXPRESA.....	IV
COMITÉ EVALUADOR.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
ABREVIATURAS	X
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Descripción del problema	11
1.2 Justificación del problema	12
1.3 Objetivos de la tesis	12
1.3.1 Objetivo general:	12
1.3.2 Objetivos específicos:.....	13
1.4 Marco teórico.....	13
1.4.1 Importancia Socioeconómica.....	13
1.4.2 El Proceso de Aireación: Requerimientos y Evolución Tecnológica.....	14
1.4.3 La Energía como Factor de Costo y Competitividad.	14
1.4.4 Fundamentos de Calidad de la Energía Eléctrica en Sistemas Industriales.....	15
1.4.4.1 Armónicos: Origen, efectos y Estándares de Limitación.....	15
1.4.4.2 Factor de potencia y la Vulnerabilidad de los Bancos Capacitores.	17
1.4.5 Convertidores de Potencia y Estrategias de Mitigación de Armónicos.....	17
1.4.5.1 Filtros Pasivos de Armónicos.	18
1.4.5.2 Filtros Activos de Armónicos.	19
1.4.6 Tecnologías de Motores Eléctricos para aplicaciones de Aireación.....	20
1.4.6.1 Motor de Inducción de Jaula de Ardilla.....	20
1.4.6.2 Motor Síncrono de Imanes Permanentes (PM).	21
1.4.7 Equipo de medición: Analizador de calidad de energía “Huazheng HZCR-5000”	22
1.4.7.1 Capacidades y parámetros medidos.	22
1.4.7.2 Aplicación en el análisis de motores.....	23
2. METODOLOGÍA.....	25

2.1 Revisión de planos y documentación técnica	26
2.1.1 Ficha Técnica Motor Imán Permanente.....	26
2.1.2 Ficha Técnica Motor Jaula de Ardilla.....	27
2.1.3 Tablas comparativas: Motor PM y Motor SCIM	28
2.2 Sistema de energización y control de motores aireadores para camaroneras.	32
2.2.1 Descripción del Proceso Integral de la camaronera	32
2.2.2 Análisis del diagrama de flujo completo.....	34
2.2.3 Tablero de Banco de Capacitores y Compensación Reactiva.....	36
2.2.3.1 Dispositivos de Control en los tableros Capacitores.....	36
2.2.3.2 Diseño Tablero Capacitor en la Camaronera.	41
2.2.4 Tablero de Arrancador para los motores Aireadores.....	43
2.2.4.1 Principio de Operación.	43
2.2.4.1 Dispositivos de Control en Tablero de Arrancador	44
2.2.4.2 Diseño Tablero Arrancador en la Camaronera	48
2.3 Valores Obtenidos	50
2.3.1 Sistema Eléctrico de Media Tensión.	50
2.3.1.1 Alimentador #1.	51
2.3.1.2 Alimentador #2.	53
2.3.2 Sistema Eléctrico de Baja Tensión.....	54
2.3.2.1 Campamento #1.	56
2.3.2.2 Campamento #2.	62
2.3.2.3 Espectros Armónicos THD de los motores.	65
3. RESULTADO Y ANÁLISIS	67
3.1 Metodología de Análisis.....	67
3.1.1 Resultados mediciones de los motores.	68
.....	69
3.2 Análisis comparativo Tecno-Económico	71
3.2.1.1 Costo Total de Propiedad (TCO -10 años).	74
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
4.1. Conclusiones	77
4.2 Recomendaciones.....	78

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CAPEX	Gasto de Capital (Capital Expenditure)
CNEL	Corporación Nacional de Electricidad (Ecuador)
FA	Filtro Activo (armónicos)
FP	Factor de Potencia
FPS	Filtro Pasivo Sintonizado
FVPA	Factor de Valor Presente de una Anualidad
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
OPEX	Operational Expenditure
PLC	Programmable Logic Controller
PM	Motor de imanes Permanentes
RTR	Controlador de Compensación Reactiva
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCIM	Motor de Inducción de Jaula de Ardilla
SNI	Sistema Nacional de Interconexión (Ecuador)
TCO	Costo Total de Propiedad
THD	Total Harmonic Distorsion
VAN	Valor Actual Neto
VFD	Variador de Frecuencia

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador se consolida como uno de los líderes mundiales en la producción y exportación de camarón, un sector que constituye un pilar fundamental de su economía, generando significativamente divisas y empleos, especialmente en las provincias costeras ((FAO), 2022). En este contexto, la optimización de los procesos productivos es un punto estratégico para garantizar la sostenibilidad y rentabilidad.

Uno de los procesos más críticos y energéticamente intensivos es la aireación artificial de los estanques. Un suministro adecuado de oxígeno disuelto es determinante para el rendimiento final de la cosecha (Boyd & Tucker, 2014). Tradicionalmente, esta función dependía de motores diésel, pero a pesar de su autonomía, presentaban elevados costos operativos por combustible y mantenimiento, dejando como resultado una contaminación ambiental, acústica y una logística compleja de suministro. Esta migración introduce complejos desafíos de ingeniería de potencia, desde la selección del tipo de tecnología del motor emerge como una decisión técnica con profundas implicancias en la confiabilidad del sistema (Bose, 2002).

Esta es principalmente la razón por la cual los motores síncronos de imanes permanentes (PM), a pesar de las altas ganancias de eficiencia (Association, IEEE Xplore / IEEE Standards, 2014), requieren convertidores de potencia electrónica (VFDs), que son fuentes conocidas de distorsiones armónicas que reducen la calidad de la energía (IEEE Std 519,2014). La interacción de estos dos fenómenos puede degradar la fiabilidad del sistema eléctrico que los proporciona.

1.1 Descripción del problema

La principal problemática radica en la evidencia de fallas recurrentes en componentes de infraestructura eléctrica (bancos de capacitores y transformadores) en camaroneras con aireación eléctrica. Estas fallas sugieren una consecuencia sistémica de una baja calidad de energía, específicamente de altos niveles de distorsión armónica (Singh, y otros, IEEE Xplore Digital Library, 2015).

Estas fallas generan costosos operativos imprevistos, paradas de producción y se cuestionan la confiabilidad del suministro. Los resultados demuestran que el problema radica en la interacción de la red eléctrica con los motores, por la generación de corriente armónicas en los dispositivos que vienen incluido en su control variadores de frecuencias (VFDs). Estas corrientes distorsionadas contaminan la calidad de energía, degradando el desempeño y la vida útil de todos los equipos conectados al mismo sistema.

1.2 Justificación del problema

Actualmente el sector camaronero en el Ecuador se encuentra dentro de las exportaciones más grandes, el país pasó de exportar 849.67 millones de dólares en el 2010 a 5323.30 millones de dólares en el 2021 y con esto los exportadores buscan mantener su posición como líder de producción en el mundo. La mayor parte de los productores de este artrópodo son grandes exportadores y aportan al crecimiento de la economía.

Económico - Operativo: Las fallas en bancos capacitores y transformadores representan pérdidas económicas debido a las reposiciones de equipos dando interrupciones en la producción. Para que el sector sea rentable, es esencial un análisis de TCO que indique la tecnología que viene con el menor "Costo Total de Propiedad (TCO)".

Técnico - Energético: Se requiere un criterio técnico explícito para elegir la tecnología del motor que se utilizará. Es crucial entender que no solo se debe envasar la eficiencia nominal del motor, sino su comportamiento armónico y su impacto sistémico en la calidad de energía.

1.3 Objetivos de la tesis

1.3.1 Objetivo general:

Analizar el sistema eléctrico de motores modelo jaula de ardilla (SCIM) y motores modelo imanes permanentes (PM) empleados en sistemas de aireación en una camaronera de la provincia del Guayas, evaluando su desempeño energético, la generación de

armónicos y el impacto en la calidad de energía, con el fin de determinar la alternativa más eficiente y confiable desde los puntos de vista técnico, económico y operativo.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Examinar los parámetros eléctricos y operativos de los motores PM y SCIM, considerando su eficiencia, factor de potencia y condiciones de funcionamiento en los sistemas de aireación.
- Evaluar la calidad de energía en los tableros y alimentadores del sistema eléctrico, identificando los niveles de distorsión armónica total (THD-V, THD-I), el factor de potencia y el cumplimiento con las normas del IEEE 519-2022.
- Comparar el comportamiento armónico y el impacto eléctrico generado por los motores PM y SCIM, determinando las diferencias en distorsión, estabilidad de factor de potencia y desempeño energético bajo distintas condiciones de carga y presencia de resonancias.
- Considerar la conveniencia técnica y económica de cada tipo de motor, en base a su costo de operación, mantenimiento, vida útil de componentes asociados y la confiabilidad del sistema, mediante un análisis de costo total de propiedad (TCO), valor actual neto (VAN) y periodo de recuperación.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Importancia Socioeconómica.

El Ecuador se ha posicionado como uno de los principales actores en el mercado global del camarón, siendo este sector un pilar fundamental para la economía nacional. Según reportes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura “FAO”, Ecuador se mantiene entre los mayores exportadores mundiales, una actividad que genera miles desde empleos directos e indirectos y aporta significativas

divisas ((FAO), 2022). La producción se concentra geográficamente en las provincias costeras, especialmente del Guayas, El Oro y Manabí, donde constituye una de las principales actividades económicas y un motor de desarrollo regional. Gracias a esto se mantiene una competitividad y sostenibilidad de la camaricultura.

1.4.2 El Proceso de Aireación: Requerimientos y Evolución Tecnológica.

La aireación es un proceso fundamental e indispensable de la camaricultura. Su función principal es mantener concentraciones adecuadas de oxígeno disuelto en el agua, un parámetro vital que condiciona directamente la tasa de alimentación, el crecimiento, la salud y la supervivencia de los organismos cultivados (Boyd & Tucker, 2014). La demanda de oxígeno es variable, incrementándose durante la noche por la respiración de la biomasa y la materia orgánica, lo que exige un sistema de aireación confiable y capaz de operar por largas jornadas, típicamente desde el atardecer hasta el amanecer.

Por lo general, este sistema cubría mediante motores de combustión interna diésel, acoplados a paletas giratorias o aireadores hélice. Si bien proporcionaban autonomía, estos sistemas presentaban notorios perjuicios: altos costos operativos por consumo de combustible, alto porcentaje de emisión de gases en efecto invernadero y contaminación acústica, mantenimiento mecánico frecuente y una logística compleja de suministro y almacenamiento de diésel en las propias piscinas.

1.4.3 La Energía como Factor de Costo y Competitividad.

La energía eléctrica ha pasado a ser uno de los insumos operativos más significativos en una camaronera moderna electrificada. Los miles de motores de aireación, operando simultáneamente durante más de 12 horas diaria, representan una carga eléctrica masiva y constante. Por lo tanto, incluso pequeñas mejoras en la eficiencia energética o reducciones en las pérdidas del sistema pueden traducirse en ahorros económicos anuales muy considerables.

1.4.4 Fundamentos de Calidad de la Energía Eléctrica en Sistemas Industriales.

La calidad de la energía eléctrica (PQ), se define como el conjunto de parámetros que describen las propiedades de la alimentación eléctrica en un punto dado de un sistema de potencia, La norma IEEE 1159-2019 la conceptualiza como la medida en que la tensión, la frecuencia y la forma de onda se ajustan al sistema establecido. Una mala calidad de energía puede manifestarse como variaciones de tensión, interrupciones, desbalance o distorsión de la forma de onda sinusoidal, comúnmente originada por armónicos.

1.4.4.1 Armónicos: Origen, efectos y Estándares de Limitación.

Los armónicos son componentes sinusoidales de tensión o corriente cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia del sistema de potencia (60Hz en Ecuador). Su origen se da en entornos industriales modernos en cargas no lineales, como los variadores de frecuencia (VFDs), fuentes de alimentación conmutadas y rectificadores, que extraen corriente en pulsos en lugar de una forma senoidal suave (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2012).

Estos son los efectos de los armónicos en un sistema eléctrico:

- **Sobrecalentamiento en Conductores y Transformadores:** Las corrientes armónicas de orden superior, incrementan las perdidas por efecto Joule en cables. En los transformadores, generan pérdidas adicionales debido a las corrientes de Foucault en el núcleo, que aumentan la frecuencia armónica, lo que lleva a una degradación térmica acelerada del aislamiento.
- **Resonancia:** La interacción entre la inductancia del sistema (transformadores, cables) y los bancos de capacitores utilizados para la compensación reactiva puede crear un circuito sintonizado.
- **Errores en Mediciones y Disparo de Protecciones:** Los instrumentos de medición y los relés de protección están generalmente calibrados para la frecuencia fundamental. Los instrumentos de medición y los relés de protección generalmente están calibrados para la frecuencia fundamental. Las armónicas pueden causar lecturas erróneas de potencia, consumo eléctrico y

factor de potencia, lo que puede llevar a fallos en el disparo de interruptores termomagnéticos y relés digitales.

El estándar internacional de referencia para el control de este fenómeno es la IEEE Std 519-2022, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". Como se muestra en la (Tabla 1.1 y 1.2) indica que la norma establece los límites máximos permisibles para la Distorsión Armónica Total (THD) de tensión y corriente, así como para los armónicos individuales, en el Punto de Acoplamiento Común (PCC) entre la utility y el usuario. Para sistemas de media y baja tensión, el límite típico para THD de tensión es del 5%, mientras que los límites de corriente dependen de la relación entre la corriente de cortocircuito disponible y la corriente de carga fundamental.

Odd harmonics non-multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3		Even harmonics	
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \cdot \frac{17}{h} - 0.27$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot \frac{10}{h} + 0.25$

Tabla 1.1 Parámetros de espectros armónicos de Tensión.

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 1.2 Parámetros de espectros armónicos de Corriente.

1.4.4.2 Factor de potencia y la Vulnerabilidad de los Bancos Capacitores.

El factor de potencia (FP) es la relación entre la potencia activa (kW) y la potencia aparente “kVA”. Un FP bajo, generalmente causado por cargas inductivas como motores, implica que se requiera más corriente para entregar la misma potencia útil, generando pérdidas y posiblemente incurriendo a penalizaciones.

La corrección del factor de potencia se logra típicamente mediante la instalación de bancos capacitores como se muestra en la (Figura 1.1) que inyecta potencia reactiva, compensando la parte inductiva de las cargas. Sin embargo, esta solución convencional presenta una vulnerabilidad crítica en presencia de armónicos, esto puede provocar sobrecalentamiento y falla prematura. Por lo tanto, en entornos con alta distorsión armónica, la compensación reactiva debe ser reevaluada, considerando el uso de capacitores con reactores en serie (filtros sintonizados).



Figura 1.1 Bancos de Capacitores.
(Amperx Group Ecuador, s.f.)

1.4.5 Convertidores de Potencia y Estrategias de Mitigación de Armónicos.

Los variadores de frecuencia (VFDs), son esenciales para el control de motores de alta eficiencia como los PM, pero se considera como fuentes primarias de armónicos en

sistemas industriales. Su arquitectura basada en rectificadores no lineales produce corrientes con un alto contenido de componentes armónicas (5° , 7° , 11° , 13°) (Bose, 2002). Para mitigar estos efectos y cumplir con las normas como la IEEE 519-2022, se emplean principalmente dos tipos de tecnologías: filtros pasivos y filtros activos.

1.4.5.1 Filtros Pasivos de Armónicos.

Los filtros pasivos son circuitos compuestos por inductores, capacitores y resistencias, configurados para crear un camino de baja impedancia a una frecuencia armónica específica. El filtro típico es el filtro sintonizado pasivo (PTF), construido para atenuar un orden armónico específico o un rango confinado. (Bose, 2002). Son dispositivos robustos, altamente confiables, de costo relativamente bajo y altamente eficientes como se muestra la (Figura 1.2), y pueden proporcionar compensación de potencia reactiva adicional a la frecuencia fundamental. (Singh, y otros, IEEE Xplore Digital Library, 2004).



**Figura 1.2 Tablero de Filtro Pasivo
(Intrans, s.f.)**

1.4.5.2 Filtros Activos de Armónicos.

Los Filtros Activos (FA) son dispositivos electrónicos de potencia basados en convertidores y procesamiento digital de señales en tiempo real. A diferencia de los pasivos, no están sintonizados a una frecuencia fija (Bhattacharya & Divan, 1995).

Son altamente efectivos y adaptativos, capaces de mitigar múltiples ordenes de armónicos simultáneamente del (2° al 50°) incluso aquello que varían rápidamente en el tiempo. La (Figura 1.3) muestra el tablero de control de un filtro activo industrial, donde se pueden observar los módulos de potencia, la electrónica de control y las interfaces de comunicación.



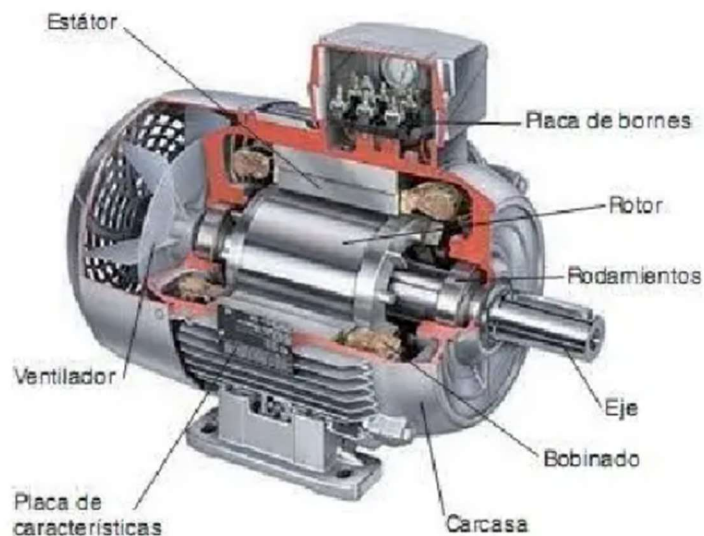
Figura 1.3 Tablero de Filtro Activo
(Nancal Electric, s.f.)

1.4.6 Tecnologías de Motores Eléctricos para aplicaciones de Aireación.

La selección del motor eléctrico es una decisión que debe ser determinada no solo por su consumo eléctrico, sino también la compatibilidad electromagnética con el resto del sistema. Para estos sistemas de aireación, se disponen de 2 tecnologías: el tradicional motor de inducción (SCIM) y el emergente motor de imanes permanentes (PM)

1.4.6.1 Motor de Inducción de Jaula de Ardilla.

También conocidas como maquinas síncronas se entienden como convertidores electromagnéticos rotativos que, girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, transforma la energía mecánica en energía eléctrica. En la (Figura 1.4) se puede visualizar que consta de un devanado inducido y un devanado inductor concatenados por un campo magnético, caracterizándose por tener el devanado inducido en el estator, alojado en ranuras practicadas en la superficie cilíndrica interna del paquete magnético y el devanado inductor, alimentado por corriente continua, en el rotor. (Cherta, 1994)



**Figura 1.4 Diagrama Motor Jaula de Ardilla
(SCRIBD, 2023)**

1.4.6.2 Motor Síncrono de Imanes Permanentes (PM).

Es un modelo en el que rotor es un imán permanente, en ello se mecanizan un numero de dientes, limitado por su estructura física. Ofrece como principal ventaja que su posicionamiento no varío aun sin excitación, y en régimen de carga.

Es un motor de alto rendimiento y precisión, donde la energía se transfiere mediante la interacción magnética directa entre campos fijos y rotatorios, pero la complejidad y su costo del rotor de imanes permanentes son el precio por alcanzar una mayor eficiencia y un control excepcional.

Partes y Funcionamiento

Su arquitectura consiste en un rotor equipado con imanes permanentes, que genera un campo magnético constante, y un estator que contiene un devanado trifásico como se muestra en la (Figura 1.5). Esta configuración elimina las pérdidas eléctricas en el rotor. Sin embargo, su funcionalidad depende de un variador de frecuencia (VFD), porque actúa como cerebro del sistema, este conjunto ofrece un control preciso y eficiente.

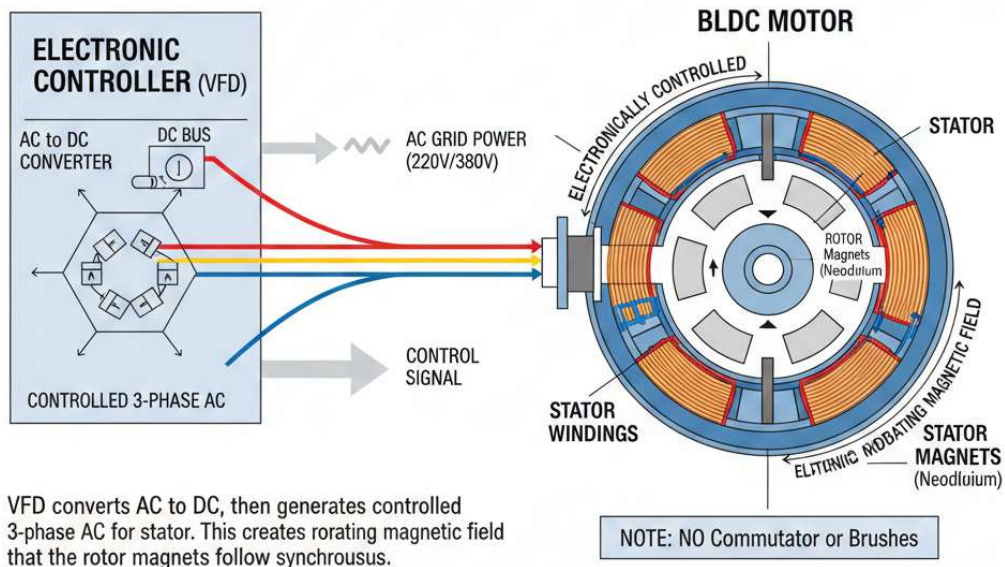


Figura 1.5 Diagrama Motor Imanes Permanentes

1.4.7 Equipo de medición: Analizador de calidad de energía “Huazheng HZCR-5000”

Para este caso de investigación, los valores presentados en este estudio, se empleó un analizador de calidad de energía trifásico modelo HUAZHENG HZCR-5000. Este instrumento es un dispositivo portátil de alta precisión diseñado específicamente para el diagnóstico integral de sistemas eléctricos de potencia. Su principal función es registrar y análisis en tiempo real de todos los parámetros eléctricos fundamentales y de calidad de energía.

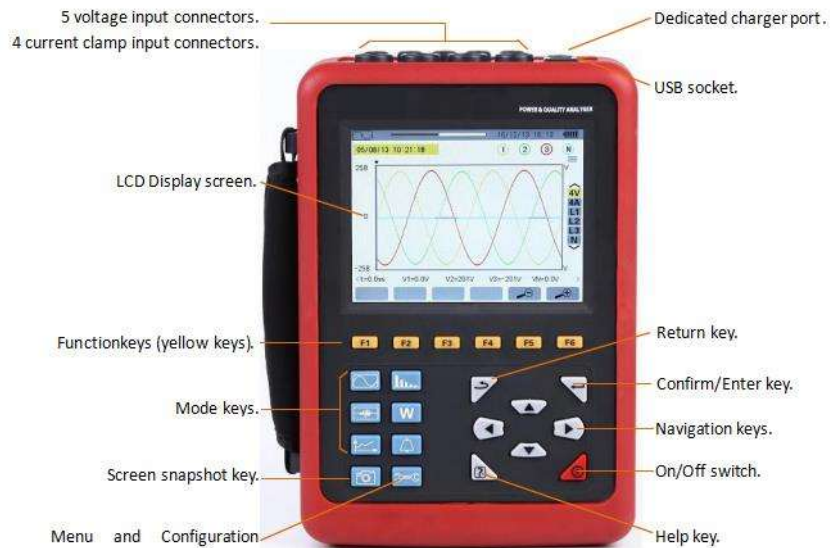


Figura 1.6 Analizador “Huazheng HZCR-5000”
(Huazheng, s.f.)

1.4.7.1 Capacidades y parámetros medidos.

- **Parámetros fundamentales:** Tensión RMS (línea – línea y fase – neutro), corriente RMS, frecuencia, potencia activa (kW), reactiva (kVAR), aparente (kVA) y factor de potencia.
- **Calidad de Energía:** Distorsión armónica total (THD) para tensión y corriente hasta el armónico de orden 50, cumpliendo con el estándar IEC 61000-4-30 Clase A.

- **Análisis de Armónicos individuales:** Magnitud y ángulo de fase para cada orden armónico (desde el 2° hasta el 50°), permitiendo la construcción de espectros completos.
- **Variaciones de Tensión:** Fluctuaciones, sobretensiones, caídas de tensión (sags) e interrupciones.



Figura 1.7 Mediciones realizadas en el sector camaronero

1.4.7.2 Aplicación en el análisis de motores.

- **Detección de niveles armónicos:** Los motores PM, al ser operados mediante variadores de frecuencia (VFDs) o arrancadores suaves, generan niveles armónicos de orden no múltiplo de 3 (5°, 7°, 11°, 13°). or el contrario, los motores SCIM que arrancan directamente producen principalmente armónicos de orden impar durante el estado transitorio; sus niveles disminuyen durante el estado estable.

- **Evaluación del impacto en la red:** El analizador no solo mide la corriente distorsionada consumida por el motor o su controlador, sino también cómo esta distorsión de corriente altera la tensión de suministro (THD-V) en el punto de acoplamiento común (PCC).
- **Correlación entre estados de operación y distorsión:** Al realizar mediciones durante varios días, el HZCR-5000 permite correlacionar los ciclos de encendido/apagado de los bancos de motores con los picos de THD de corriente. Esto ayuda a confirmar si la máxima distorsión coincide con la carga máxima o con estados intermedios donde puede ocurrir resonancia.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

Se desea desarrollar un estudio de metodología de investigación mixta, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos en un diseño de investigación aplicada y estudio de caso. El enfoque de este estudio es diagnosticar un problema de operativo real para caracterizar sus causas técnicas e implementar soluciones factibles mediante un análisis integral.



2.1 Revisión de planos y documentación técnica

2.1.1 Ficha Técnica Motor Imán Permanente

Fabricante / Modelo:	SEAFULL – PM (Permanent Magnet) High Efficiency Paddle Wheel Aerator.
Tipo de Motor:	Síncrono de Imanes Permanentes (PMAC/PM motor)
Potencia:	3 HP (2.2 kW)
Factor de potencia:	0.95 - 0.98 (carga nominal)
Voltaje:	440 V (Trifásico)
Corriente Nominal:	5.5 A
Frecuencia:	60Hz
Velocidad:	142 RPM (Síncrona, a plena carga)
Factor de Servicio (S.F.):	1.15
Clase de Aislamiento:	F
Clase de Protección (IP):	IP55 (Para ambiente húmedo / exterior)
Método de Arranque / Control:	Soft Starter (Arrancador Suave)
Tipo de Eficiencia:	High Efficiency
Conexión:	Estrella (Y) para 440 V
Norma de Fabricación:	IEC 60034



Figura 2.1 Aireador motor modelo Imán Permanente
(Mindiamart, s.f.)

2.1.2 Ficha Técnica Motor Jaula de Ardilla

Fabricante / Modelo:	WEG – W22 IE3
Tipo de Motor:	SCIM (Squirrel Cage Induction Motor – JA de Rotor Bobinado)
Potencia:	2 HP (1.5 kW)
Factor de potencia:	0.83 - 0.85
Voltaje:	440 V (Trifásico)
Corriente Nominal:	3.0 A
Frecuencia:	60Hz
Velocidad:	1800 RPM (Asíncrona, velocidad cercana a síncrona: 1800 RPM)
Factor de Servicio (S.F.):	1.15
Clase de Aislamiento:	F
Clase de Protección (IP):	IP55 (Para ambiente húmedo / exterior)
Método de Arranque / Control:	Directo (DOL) o Estrella – Triangulo (Y - Δ)
Nivel de Eficiencia:	IE3
Conexión:	Normalmente delta (Δ) para 440V
Norma de Fabricación:	IEC 60034 / NEMA MG-1



**Figura 2.2 Aireador motor modelo Jaula de Ardilla
(Crupesa, s.f.)**

2.1.3 Tablas comparativas: Motor PM y Motor SCIM

Parámetro	MOTOR #1 SEAFULL PM	MOTOR #2 WEG SCIM	IMPLICACION PRÁCTICA
Tecnología	Síncrono de Imanes Permanentes (PM)	Inducción Jaula de Ardilla (SCIM)	El PM es más avanzado y eficiente
Aplicación	Aireador de rueda de paletas (acuicultura)	Uso industrial general (bombas, ventiladores, etc.)	Especializado vs Versátil
Potencia	3 HP (2.2 KW)	2 HP (1.5 KW)	Mayor potencia útil
Voltaje	440 VAC trifásico	440 VAC trifásico	Compatibles con misma red
Corriente Nominal	5.5 A	~3.0 A	Mayor consumo en PM por mayor potencia
Velocidad	142 RPM	~1750 - 1780 RPM	RPM incluye reductor
Factor de Potencia	0.95 - 0.98	0.83 - 0.85	PM no requiere compensación reactiva
Eficiencia Energética	Muy Alta (IE4 / IE5)	Alta (IE3 - Premium)	Menor costo operativo con PM
Método de Arranque	Soft Starter	Directo o Estrella - Triangulo	PM tiene arranque más suave
Consumo Reactivo	Muy bajo (~0.3 - 0.7 kVAR)	Significativo (1.3 - 1.4 kVAR)	SCIM requiere de capacitores
Potencia Aparente (kVA)	~4.2 kVA	~2.3 kVA	Mayor demanda aparente en PM
Diseño Mecánico	Sistema Integrado (motor + reductor)	Motor independiente (necesita acople)	PM es una solución completa
Costo Inicial	Alto (tecnología premium)	Moderado (tecnología estándar)	Inversión vs Ahorro operativo
Mantenimiento	Muy bajo (sin escobillas, menos partes)	Moderado (rodamientos, posibles mantenimientos)	Menor downtime con PM
Control de Velocidad	Excelente	Limitado	PM es ideal para aplicaciones de velocidad variable
Tamaño/Espacio	Compacto (integrado con reductor)	Motor estándar	PM ahorra espacio en instalación
Clase de Aislamiento	F	F	Similar resistencia térmica
Clase de Protección	IP55 o superior (para exterior / húmedo)	IP55 (estándar)	Ambos para ambientes industriales

Regulación de Carga	Excelente eficiencia en carga (alta carga)	Pobre (eficiencia cae en carga parcial)	PM mantiene rendimiento en variaciones
----------------------------	--	---	--

Tabla 2.1 Datos técnicos entre motor PM y SCIM

ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO DETALLADO		
Concepto	Motor PM 3HP	Motor SCIM 2HP
Potencia Activa (kW)	2.2 kW	1.5 kW
Potencia Aparente (kVA)	4.2 kVA	2.3 kVA
Corriente por kW	2.5 A/kW	2.0 A/kW
Energía Reactiva	Prácticamente nula	Requiere compensación

Tabla 2.2 Análisis de consumo eléctrico

CUADRO COMPARATIVO			
Criterio	Motor PM	Motor SCIM	Notas
Eficiencia energética	✓		Para operación continua >4000 hrs/año
Costo inicial		✓	Presupuesto limitado
Factor de potencia	✓		Evitar recargos en factura eléctrica
Disponibilidad		✓	Necesidad inmediata
Mantenimiento	✓		Zonas remotas o difícil acceso

Tabla 2.3 Cuadro comparativo de rendimiento

VENTAJAS	
<p style="text-align: center;">MOTOR SEAFULL PM (3HP)</p> <p>1. Eficiencia Energética Extrema</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendimiento >95% en punto de operación ➤ Pérdidas reducidas 30-50% vs motores estándar <p>2. Factor de Potencia Excelente</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $\cos \phi \approx 0.98-1.0$ (casi potencia pura activa) ➤ No requiere bancos de capacitores ➤ Elimina penalizaciones en factura eléctrica <p>3. Bajo Mantenimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sin escobillas ni anillos rozantes ➤ Menos partes móviles susceptibles a fallo ➤ Lubricación sellada (en sistema reductor) <p>4. Control y Desempeño Superior</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Arranque suave intrínseco (protege mecánica) ➤ Alta densidad de par (más potencia en menor tamaño) ➤ Excelente regulación de velocidad <p>5. Optimizado para Aplicación Específica</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sistema integrado motor + reductor + paletas ➤ Diseñado específicamente para oxigenación acuícola ➤ Mejor relación empuje/consumo eléctrico 	<p style="text-align: center;">MOTOR WEG SCIM IE3 (2HP)</p> <p>1. Costo Accesible</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Precio competitivo y amplia disponibilidad ➤ Mejor relación costo/potencia inicial <p>2. Disponibilidad y Estándar</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Repuestos universales y fáciles de conseguir ➤ Cualquier taller eléctrico puede repararlo ➤ Documentación y conocimiento ampliamente difundido <p>3. Robustez y Durabilidad</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tolerante a sobrecargas momentáneas ➤ Resistente a ambientes hostiles (con protección adecuada) ➤ Tecnología probada por décadas <p>4. Flexibilidad de Instalación</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Se acopla a múltiples aplicaciones (bombas, ventiladores, etc.) ➤ Fácil adaptación mediante poleas, reductores o acoples ➤ Voltajes duales en muchos modelos (220/440V) <p>5. Compatibilidad Universal</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Funciona con cualquier variador de frecuencia estándar ➤ Arrancadores convencionales (DOL, Y-Δ, suaves) ➤ Normativa IEC/NEMA ampliamente soportada

Tabla 2.4 Cuadro comparativo de ventajas entre PM y SCIM

DESVENTAJAS	
<p style="text-align: center;">MOTOR SEAFULL PM (3HP)</p> <p>1. Alto Costo Inicial</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 40-100% más caro que motor SCIM e equivalente ➤ Tecnología premium con sobrecosto <p>2. Dependencia del Fabricante</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Repuestos especializados y menos disponibles ➤ Reparaciones complejas (requieren técnicos expertos) ➤ Posible mayor tiempo de entrega para componentes <p>3. Sistema Integrado (Poco Flexible)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ No se puede reemplazar solo el motor ➤ Si falla el reductor, afecta todo el sistema ➤ Dificultad para adaptar a otras aplicaciones <p>4. Sensibilidad a Sobre temperatura</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Imanes permanentes pueden desmagnetizarse >150°C ➤ Requiere protección térmica más sensible <p>5. Limitaciones en Ambientes Extremos</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sensible a vibraciones excesivas ➤ Posible corrosión en imanes si hay humedad interna 	<p style="text-align: center;">MOTOR WEG SCIM IE3 (2HP)</p> <p>1. Baja Eficiencia en Carga Parcial</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendimiento cae dramáticamente <75% carga ➤ Cos ϕ puede bajar a 0.5-0.6 en cargas ligeras <p>2. Alto Consumo de Reactivos</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Requiere compensación con capacitores ➤ Penalizaciones en factura por bajo factor de potencia ➤ Mayor corriente aparente para misma potencia útil <p>3. Arranque Problemático</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Alta corriente de arranque (5-7 veces I nominal) ➤ Golpe mecánico (torque de arranque brusco) ➤ Posibles caídas de tensión en la red <p>4. Mayor Mantenimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rodamientos requieren lubricación periódica ➤ Posible desgaste de escobillas en algunos modelos ➤ Calentamiento más pronunciado <p>5. Control de Velocidad Limitado</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sin variador: velocidad casi fija ➤ Con variador: rango limitado y menor eficiencia ➤ Problemas de calentamiento a bajas velocidades

Tabla 2.5 Cuadro comparativo de desventajas entre PM y SCIM

2.2 Sistema de energización y control de motores aireadores para camaroneras.

2.2.1 Descripción del Proceso Integral de la camaronera

El sistema de energización de motores aireadores para camaroneras representa una infraestructura eléctrica compleja que integra múltiples niveles de tensión, sistemas de control y protecciones. El proceso inicia en la Red Nacional de Interconexión (SNI) que suministra energía en alta tensión (69kV) a la subestación principal de la camaronera. Esta configuración es típica en sistemas industriales de mediana y gran escala, donde la energía se transmite en alta tensión para reducir pérdidas.

Los campamentos de la camaronera implementa una arquitectura de un sistema eléctrico, como una topología jerárquica:

1. **Nivel de transmisión (69 kV):** Recepción y distribución primaria
2. **Nivel de subtransmisión (13.8 kV):** Distribución interna en media tensión
3. **Nivel de utilización (440 V):** Alimentación directa a cargas
4. **Nivel de control (120 V):** Sistemas de automatización y protección

El transformador de potencia principal (69 kV/13.8 kV) proporciona protección diferencial (87T) y cumple con las normas IEEE C37.91-2000 para la protección de transformadores, permitiendo la identificación rápida de fallas internas.

La distribución a las piscinas individuales se realiza a través de alimentadores radiales a 13.8 kV, optimizados por la sección del conductor con referencia a la corriente de carga y la caída de voltaje permitida.

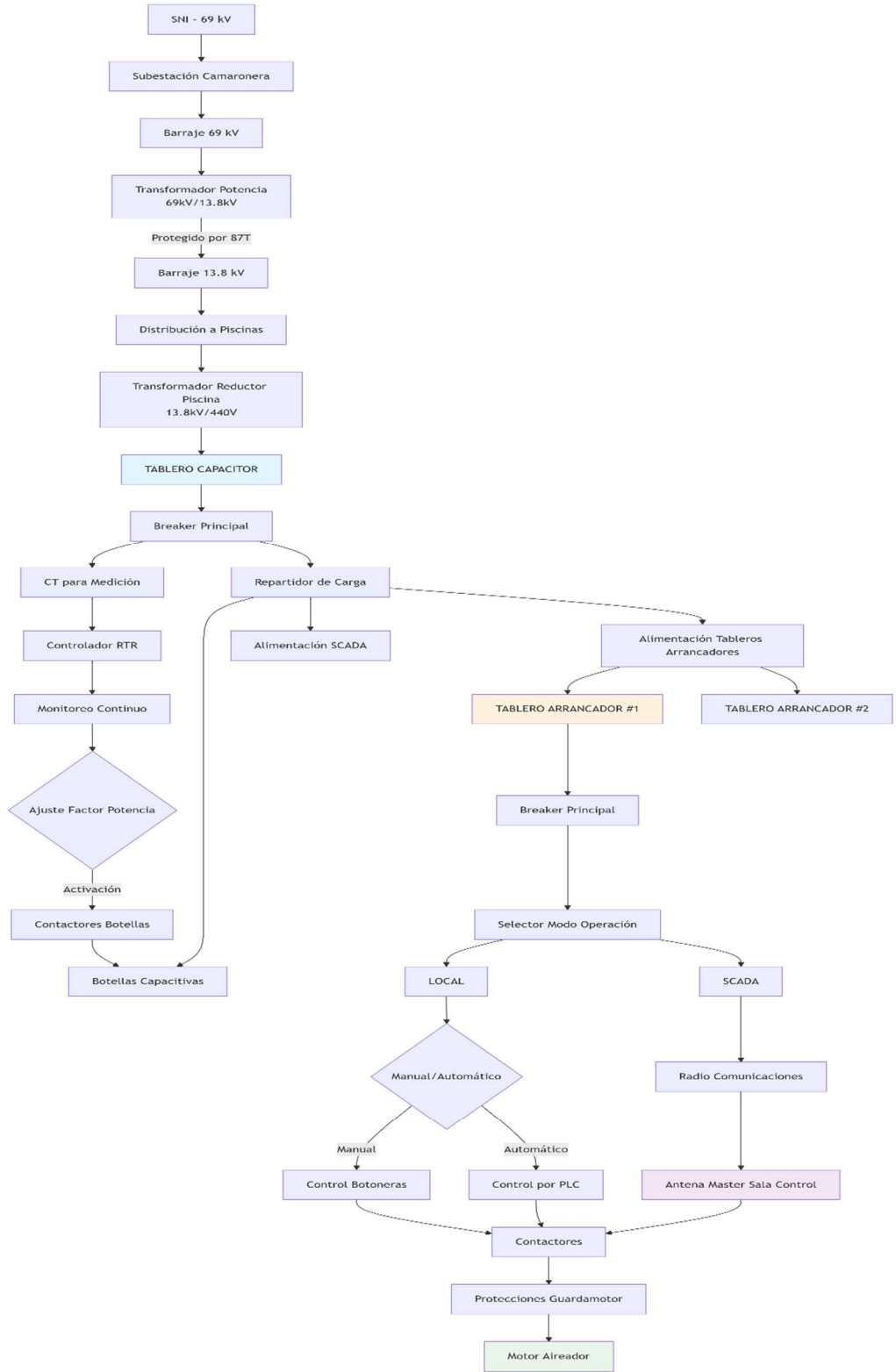


Figura 2.3 Diagrama de flujo del proceso total de los motores en las camaroneras

2.2.2 Análisis del diagrama de flujo completo.

El flujo presenta cuatro etapas principales:

Etapas 1 – Alimentación Primaria (69 kV → 13.8 kV):

- El transformador lleva una eficiencia típica del 98.5 - 99.3%
- Protección diferencial 87T con sensibilidad < 5% de I nominal
- Coordinación con protecciones de sobre corriente temporizadas

Etapas 2 – Distribución Secundaria (13.8 kV → 440 V):

- Transformadores reductores por piscinas
- Capacidad de transformación calculada según NTC 2050
- Impedancia de cortocircuito típica 5-7% para limitar corrientes de falla

Etapas 3 – Tablero Capacitor: Compensación Reactiva (440 V):

- Sistema automático mediante un controlador RTR
- Respuesta en tiempo real (<100 ms)
- Ahorro estimado de 15-25% en facturación por energía reactiva

Etapas 4 – Tablero Arrancador: Control de motores aireadores (440 V → Motores):

- Un sistema de 3 modos de operación a los motores aireadores
- Comunicación SCADA con protocolo IEC 60870-5-104
- Protecciones coordinadas según curva de daño del motor

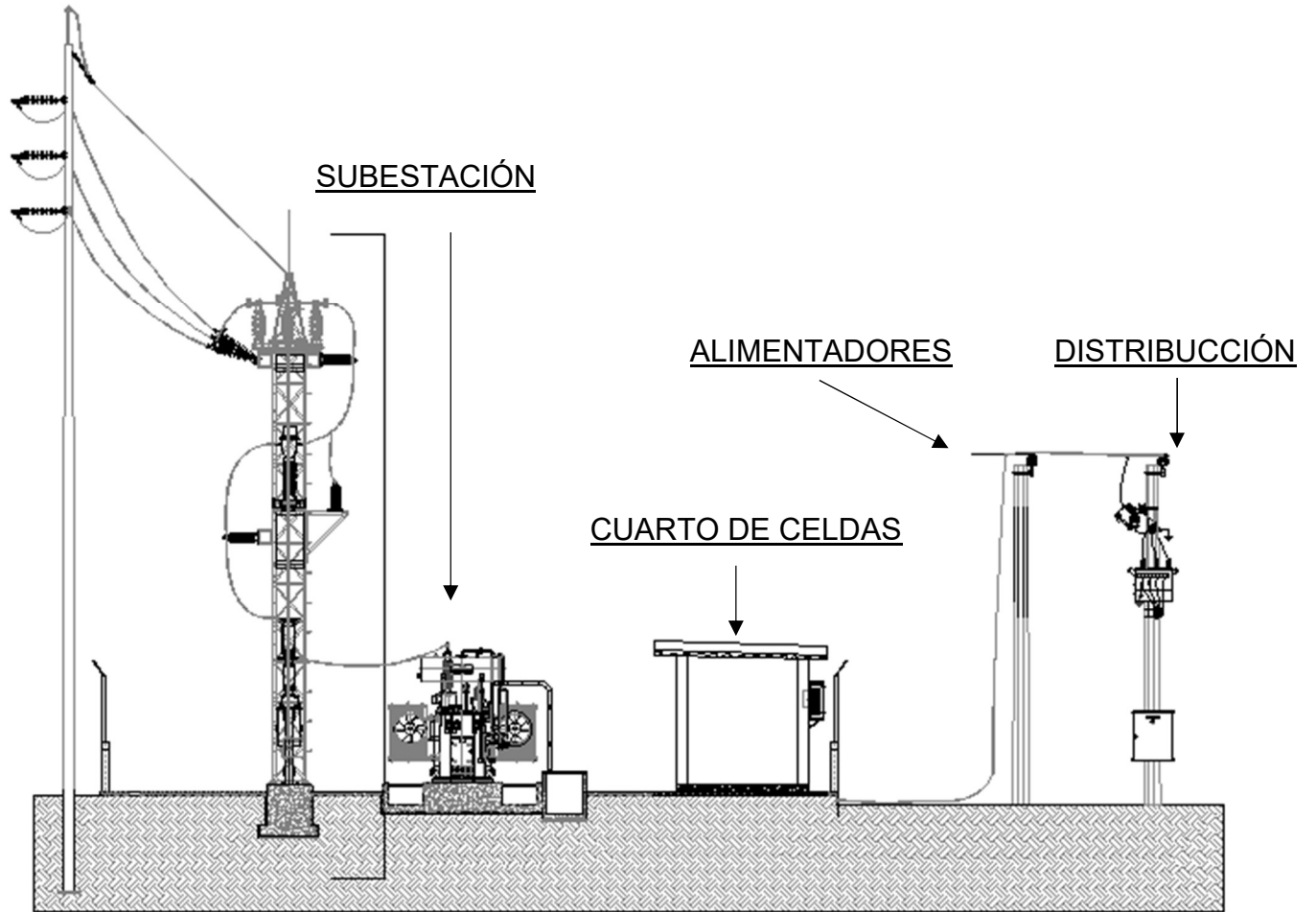


Figura 2.4 Esquema general de energización de la camaronera

2.2.3 Tablero de Banco de Capacitores y Compensación Reactiva.

El tablero capacitor es un sistema de compensación reactiva automática diseñado específicamente para corregir y optimizar el factor de potencia (FP) en instalaciones eléctricas industriales.

Sus principales funciones son:

- Compensar la potencia reactiva inductiva generada por cargas como motores, transformadores y equipos electromagnéticos.
- Mejorar la eficiencia energética global de la instalación
- Cumplir con normativas de calidad de energía y evitar penalizaciones económicas.

Principio de Operación

Se envasa al principio de compensación paralela, el tablero capacitor inyecta potencia reactiva capacitiva (Q_C) que contrarresta la potencia inductiva (Q_L) consumida por las cargas:

$$Q_{total} = Q_L - Q_C$$

Donde al optimizar Q_C , se logra:

$$FP_{corregido} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}} \approx 1.0$$

2.2.3.1 Dispositivos de Control en los tableros Capacitores.

- ✓ Breaker Principal

Utilizado para protección general del tablero contra sobre corrientes y cortocircuitos, seleccionado según la capacidad máxima del transformador reductor.

$$I_n = \frac{S_{trafo}}{\sqrt{3} \times V}$$



**Figura 2.5 Breaker Caja moldeada
(Gonzaga y Rodriguez, 2023)**

✓ Transformador de Corriente (CT)

Dispositivo primario que convierte la corriente alta del sistema a una señal baja y manejable para el controlador. Los CTs lee las señales de corriente constantemente que fluye por el alimentador.

$$R_{CT} = \frac{I_{primario}}{I_{secundario}}$$



**Figura 2.6 Transformador de corriente 100/5 A
(Chint, 2023)**

✓ Controlador RTR (Request to Respond)

Es un controlador automático de factor de potencia que gestiona la conexión y desconexión de etapas de un banco de capacitores fijos para compensar la energía reactiva inductiva de una instalación eléctrica, manteniendo el factor de potencia dentro de rangos óptimos.

Para ello se requiere de un transformador de corriente (CT) para la lectura de voltaje (VT/PT) como la corriente misma, para calcular la potencia real (kW), la potencia reactiva (kVAR) y por ende el factor de potencia.

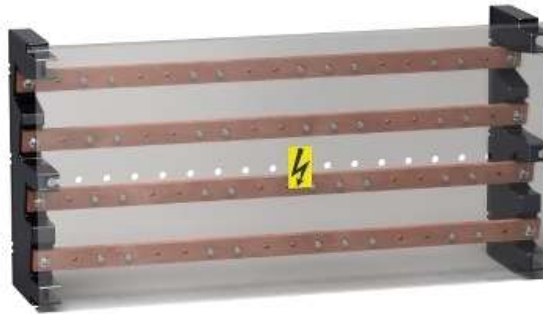
Esto le permite al controlador distinguir si el sistema necesita reactivos (carga inductiva, FP atrasado) o si ya está sobre compensado (carga capacitiva, FP adelantado).



**Figura 2.7 Controlador de Factor de potencia RTR
(RTR Energy, 2022)**

✓ Barraje de distribución

Conductor rígido de cobre de alta conductividad donde se conectan todos los elementos de salida. Distribuye la energía eléctrica a los diferentes circuitos del sistema, incluyendo los bancos capacitivos y tableros arrancadores.



**Figura 2.8 Barraje de distribución de 4 puntos
(Schneider Electric, 2024)**

- ✓ Contactor para Bancos Capacitivos
Interruptores electromagnéticos especializados para operación frecuente de bancos capacitivos, diseñados para soportar picos de corrientes.



**Figura 2.9 Contactor Electromagnético
(ABB, 2024)**

✓ Bancos capacitores (Botellas Capacitivas)

Grupos capacitores organizados en etapas independientes para compensación escalonada de potencia reactiva, cada banco es conmutado mediante un contactor electromagnetico de potencia, reciben la orden de cierre/apertura desde el controlador RTR.



**Figura 2.10 Banco de Capacitores
(WEG, 2024)**

✓ Transformador de control

Transformador aislador que proporciona alimentación segura de 440VAC a 120VAC a los circuitos del controlador RTR, los reles auxiliares y los contactores, asegurando un nivel de tensión seguro y estable para la electrónica.



**Figura 2.11 Transformador seco de control
(Rigotech, 2023)**

2.2.3.2 Diseño Tablero Capacitor en la Camaronera.

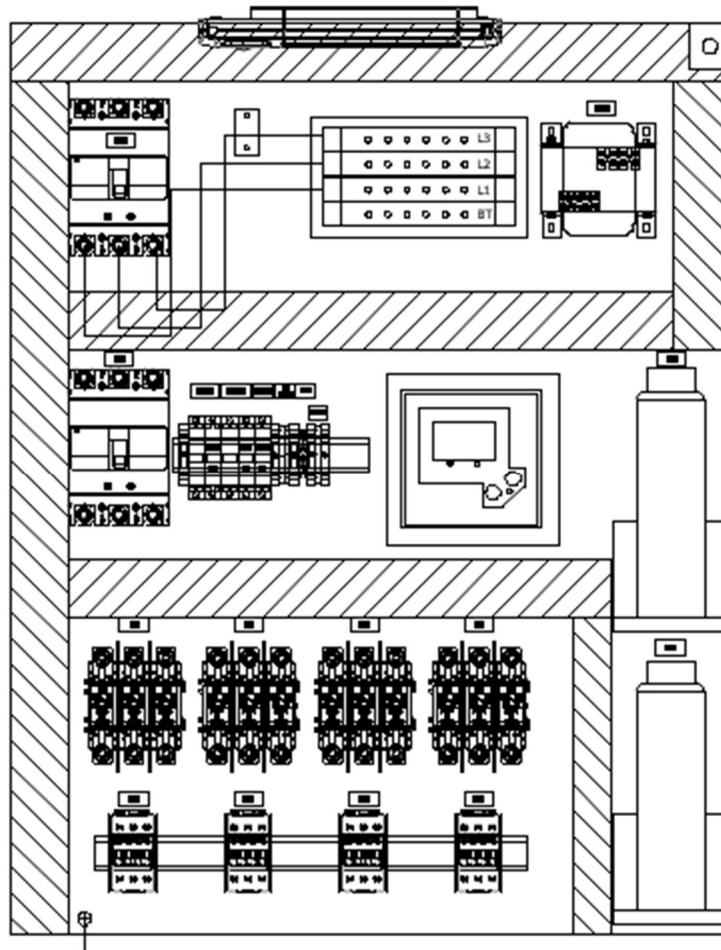


Figura 2.12 Tablero Capacitor

En la figura 2.12 se muestra el diseño del tablero capacitor, también conocido como Tablero de Distribución y Compensación Automática de Reactivos, su diseño sigue una configuración estandarizada para aplicaciones industriales, integrando protección, distribución, medición, control y compensación en un solo tablero.

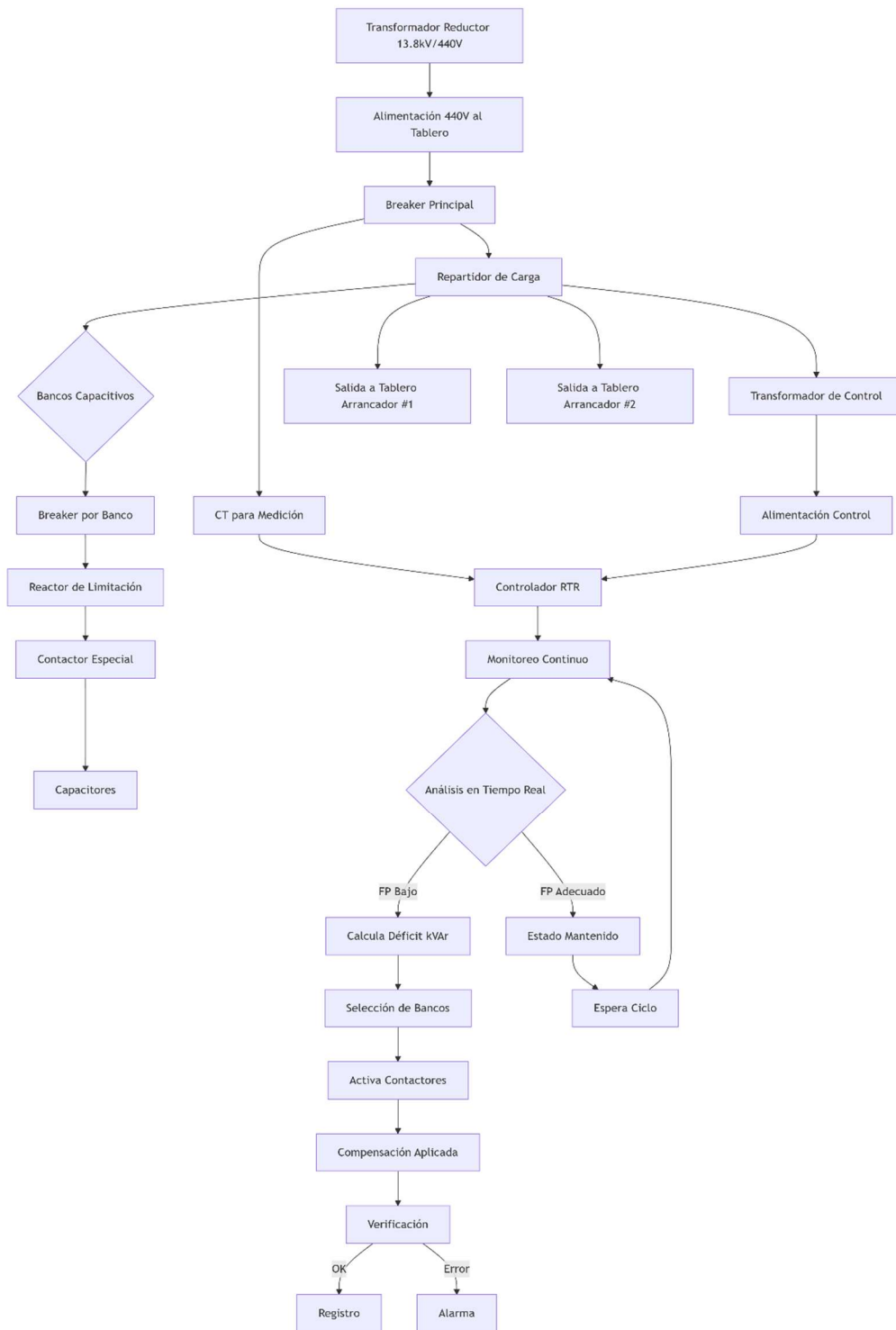


Figura 2.13 Diagrama de flujo de proceso Tablero de Capacitores

En la figura 2.13 se detalla un sistema de compensación reactiva que optimiza el factor de potencia mediante control automático basado en medición continua de parámetros eléctricos. Implementa algoritmos de selección de botellas capacitivos para minimizar penalizaciones y maximizar eficiencia energética.

2.2.4 Tablero de Arrancador para los motores Aireadores.

El tablero arrancador es un sistema integral de control, protección y operación de motores eléctrico, diseñado específicamente para gestionar de manera segura y eficiente los motores aireadores en camaroneras. Su funcionalidad principal abarca tres aspectos fundamentales:

- Control secuencial: realizar un manejo ordenado secuencial de arranque/parada
- Protección interna: dispositivos que ayudan a proteger al motor y sistemas eléctricos ante fallas.
- Operación flexible: múltiples modos de operación que requiera el operador a sus necesidades de producción.

2.2.4.1 Principio de Operación.

Cada piscina camaronera cuenta con un tablero de control, este tablero de control integra el microcontrolador, módulos de entradas-salidas y elementos de protección para el actuador que para este caso puntual nos referimos a los aireadores, por lo tanto, un tablero de control controla máximo de 10 aireadores. En consecuencia, toda la información que se recopila se procesa y luego manda la orden se encarga del módulo de radio frecuencia a través de un cable ethernet por puertos RJ45. Esta recopilación de datos converge a una antena receptora y la envía a otra antena principal ubicada en los cuartos de monitoreo, supervisión y control para ser sintetizada por un operador a través de las interfaces de monitoreo.

2.2.4.1 Dispositivos de Control en Tablero de Arrancador

✓ Breaker principal

Dispositivo de protección de corriente principal que combina protección térmica (sobrecarga) y magnética (cortocircuito). Opera como primera línea de defensa contra fallas severas, estableciendo un límite máximo de corriente admisible para todo el tablero, protegiendo tanto los componentes internos del tablero.



**Figura 2.14 Breaker Caja Moldeada de mayor Amperaje
(Bombero, 2024)**

✓ Supervisor de tensión

Dispositivo electrónico inteligente que realiza monitoreo continuo de parámetros de calidad de energía en tiempo real. Detecta no solo desviaciones de tensión ($\pm 10\%$ de 440VAC), sino también desbalance entre fases. Su función principal es prevenir daños a los motores por condiciones eléctricas adversas antes de que ocurran.



**Figura 2.15 Relé de supervisor de Tensión
(Siemens, 2024)**

✓ Controlador Lógico Programable (PLC)

Dispositivo electrónico programable que ejecuta algoritmos de control secuencial y temporal basados en lógica booleana, temporizadores, contadores y comparadores. Automatiza los ciclos de aireación según parámetros preestablecidos (horarios, secuencias, prioridades) optimizando el consumo energético y asegurando condiciones óptimas para la producción camaronera sin intervención humana constante.



**Figura 2.16 Controlador Lógico Programable (PLC)
(Lovato electric, 2024)**

✓ Sistema de comunicación SCADA

Consiste en un esquema de telemetría y telecontrol que establece un enlace bidireccional entre el tablero arrancador y el sistema central de supervisión. Utiliza protocolos industriales estandarizados como el “Modbus TCP”, esto permite una supervisión y control del tablero a distancias largas, permitiendo una gestión centralizada, análisis histórico y realizar acciones de forma remota a condiciones anormales desde una sala de control.

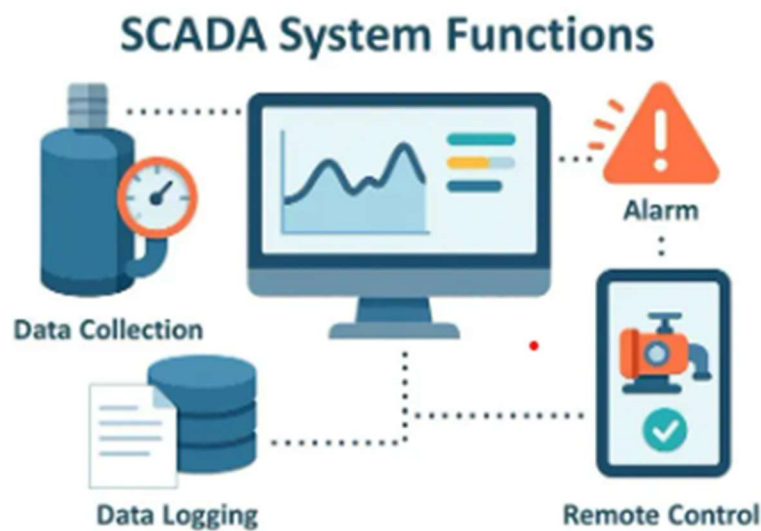


Figura 2.17 Esquema de Operación SCADA
(Biblus, 2024)

✓ Relé de protección (Guardamotor)

Dispositivo de protección inteligente que modela el comportamiento térmico del motor. Implementa múltiples curvas de protección (sobrecarga, desbalance, falla a tierra) basadas en las características específicas de cada motor, esto permite proteger y prolongar la vida útil del motor.



**Figura 2.18 Relé de protección para motores (Guardamotor)
(WEG, 2024)**

✓ Contactores para motores aireadores

Interruptores electromagnéticos de potencia diseñados específicamente para la conmutación frecuente de cargas inductivas. Ejecutan físicamente los comandos de encendido/apagado recibidos del sistema de control, manejando las altas corriente de los motores de manera segura.



Figura 2.19 Contactor Electromagnético
(Chint, 2024)

2.2.4.2 Diseño Tablero Arrancador en la Camaronera

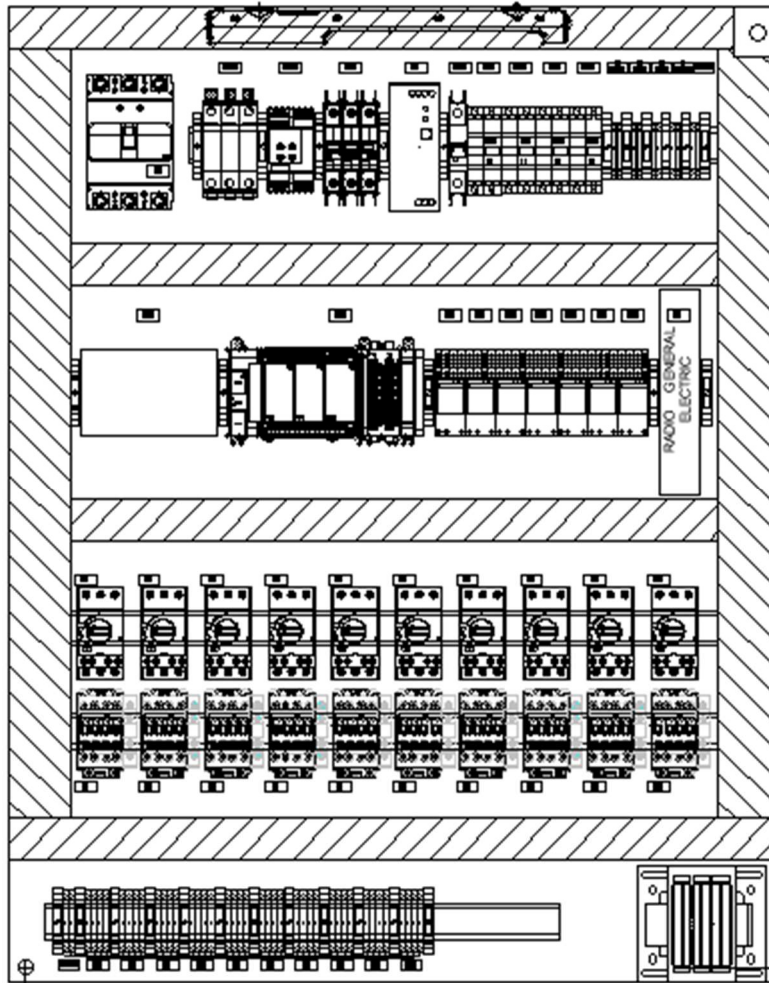


Figura 2.20 Tablero Arrancador

En la figura 2.20, se muestra el diseño de los componentes que realizan la operación de control y protección de los motores aireadores, la fuente primaria de cargas no lineales en el sistema. Su diseño permite la adaptación de operación del operador.

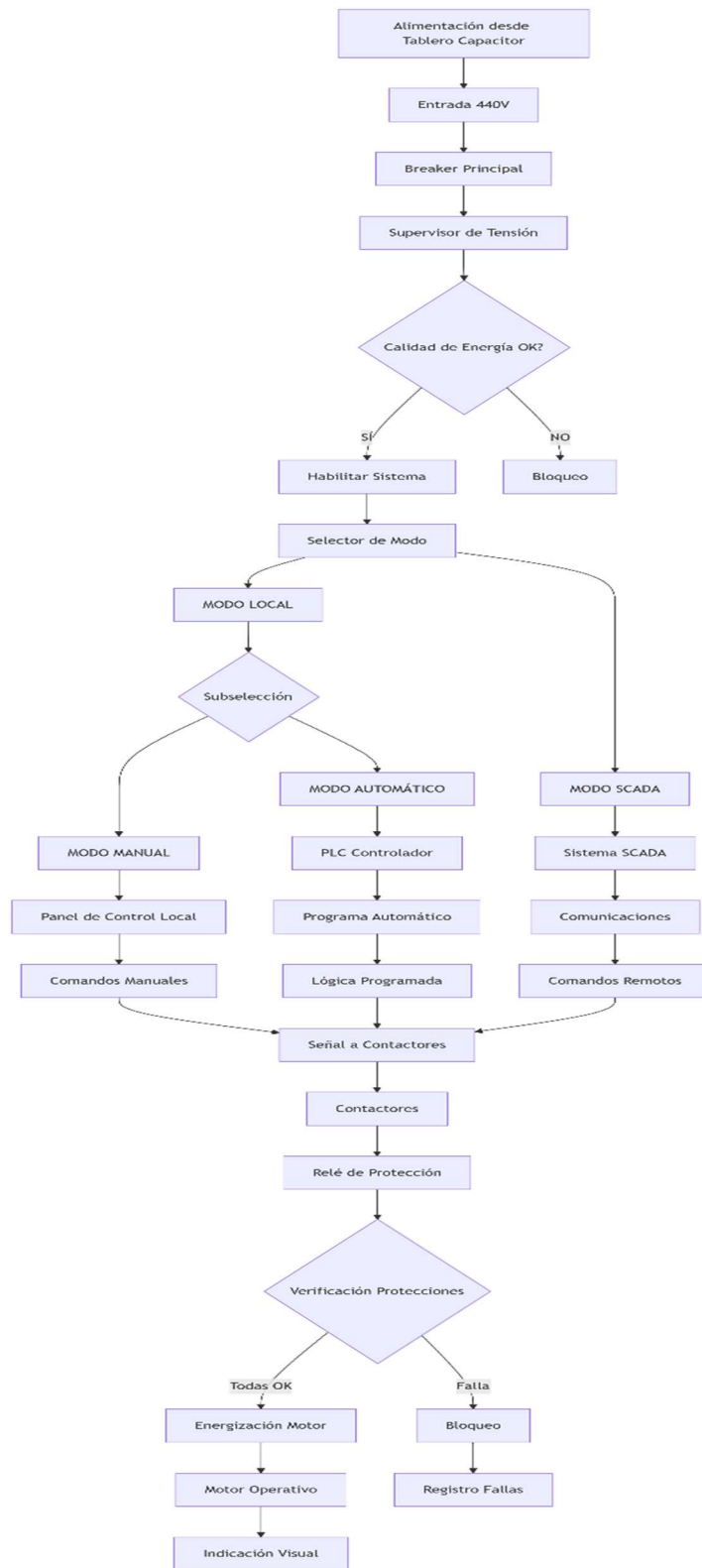


Figura 2.21 Diagrama de flujo de proceso Tablero de Arrancadores

El tablero arrancador cuenta con un sistema que integra múltiples modos de operación que garantizan continuidad operativa como se muestra en la (Figura 2.21). Esta arquitectura de control establecida puede operarse en modo local: automática y manual o en modo con supervisión centralizada SCADA, implementando protecciones coordinadas y diagnósticos avanzados.

2.3 Valores Obtenidos

Se presentan los resultados en valores cuantitativos obtenidos de las mediciones de campo realizadas en el sistema eléctrico bajo estudio. Los datos reflejan el estado operativo real de la instalación, capturando el comportamiento de los parámetros eléctricos fundamentales tanto en condiciones de carga mínima como máxima. La información se organiza en dos niveles: los valores correspondientes al sistema de media tensión, medidos en los alimentadores principales que distribuyen energía a los diferentes sectores; y los del sistema de baja tensión, registrados en tableros de distribución específicos localizados en los puntos que energizan a los tableros de operación de los motores.

2.3.1 Sistema Eléctrico de Media Tensión.

Los valores presentados en esta sección corresponden a las mediciones realizadas en la barra de salida de los alimentadores principales de media tensión. Cada alimentador suministra energía a un conjunto específico de cargas, compuesto principalmente por grupos de motores. Los parámetros incluyen los valores de tensión línea – línea, corriente por fase, distorsión armónica total (THD) para tensión y corriente, y el factor de potencia. El análisis de estos valores permitirá identificar que alimentadores presentan mayores distorsiones y requieren intervención prioritaria.

2.3.1.1 Alimentador #1.

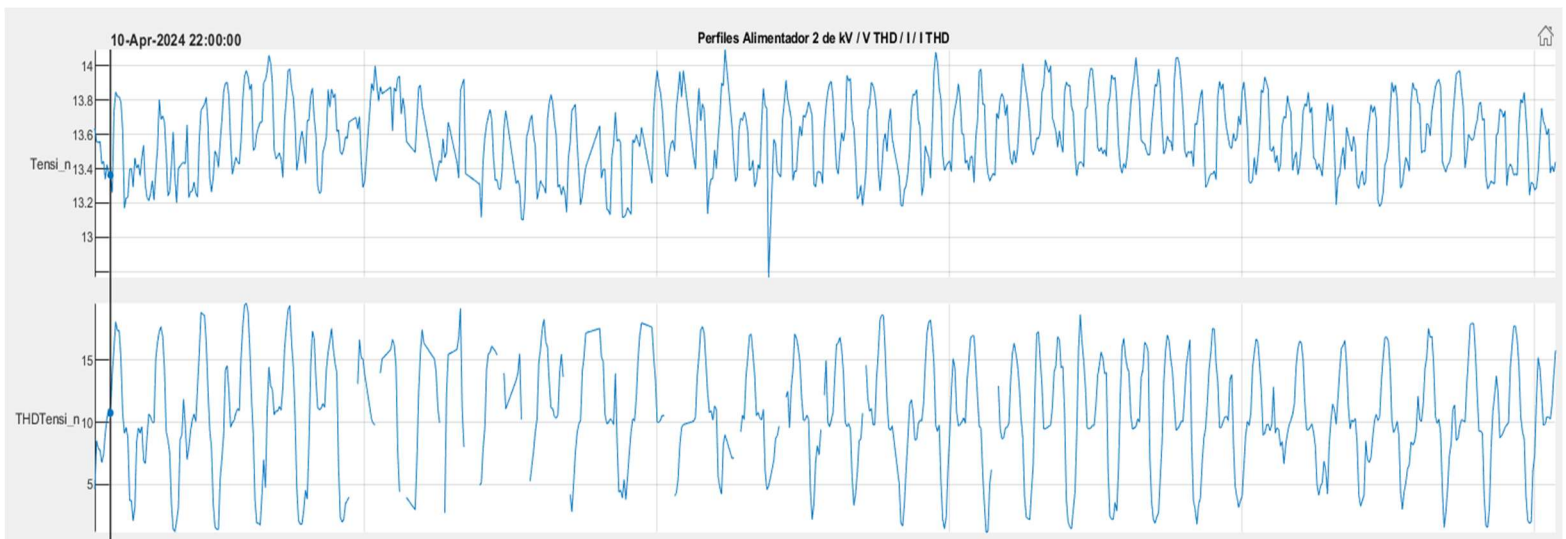
La celda del alimentador suministra a la red energética al campamento a un aproximado de 459 motores modelos PM, las (Tablas 2.1 y 2.2) muestran los valores tomados de la medición del alimentador #1.

	TENSIÓN LÍNEA - LÍNEA			CORRIENTE TRIFÁSICA		
	kV1	kV2	kV3	L1	L2	L3
MÁXIMO	14.09	14,15	14,11	146.80	150.42	147.79
PROMEDIO	13.58	13,61	13,60	80.74	83.04	80.88
MÍNIMO	12.76	12,77	12,74	3.20	3.12	2.57

Tabla 2.1 Datos de medición Tensión y Corriente - Alimentador #1.

	THD TENSIÓN			THD CORRIENTE		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	19.58	17.95	13.42	190.14	176.79	150.93
PROMEDIO	10.51	9.59	6.85	19.94	18.67	17.63
MÍNIMO	1.16	1.08	0.83	1.29	1.06	1.18

Tabla 2.2 Datos de medición THD Tensión y THD Corriente - Alimentador #1.



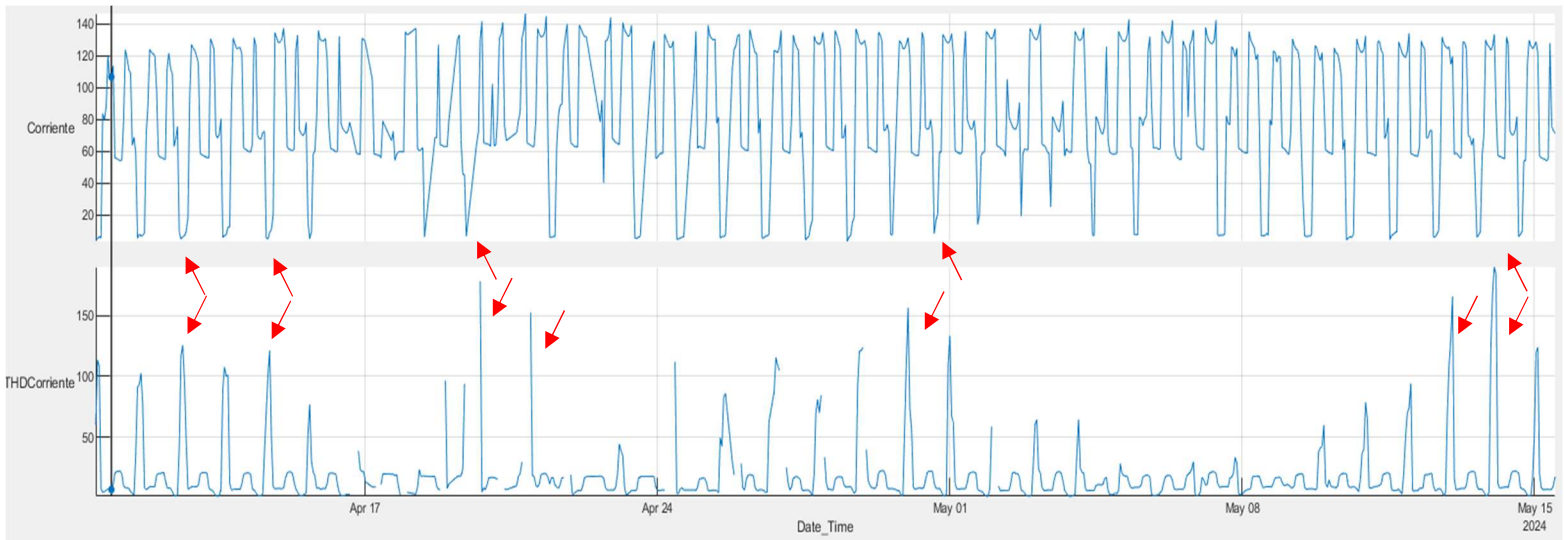


Figura 2.22 Gráficas mediciones Calidad de Energía – Alimentador #1

Se evidencia una distorsión armónica de corriente (THD-I) crítica durante los picos de operación, cuando la carga esta tentativamente nula, los armónicos de corriente suben a valores máximos registrados que superan el 190% en una de las fases como se muestra en la (Figura 2.22). Este nivel exorbitante, es un indicador contundente de la operación masiva de cargas no lineales con alto contenido de armónicos característicos (5° , 7° , 11° , 13°). Paralelamente, la distorsión armónica de tensión (THD-V) presenta un promedio del 10.51%, valor que duplica el límite máximo permisible del 5% estipulado por la norma IEEE 519 para sistemas de distribución. Este exceso confirma que la red sufre una contaminación armónica generalizada y severa.

2.3.1.2 Alimentador #2.

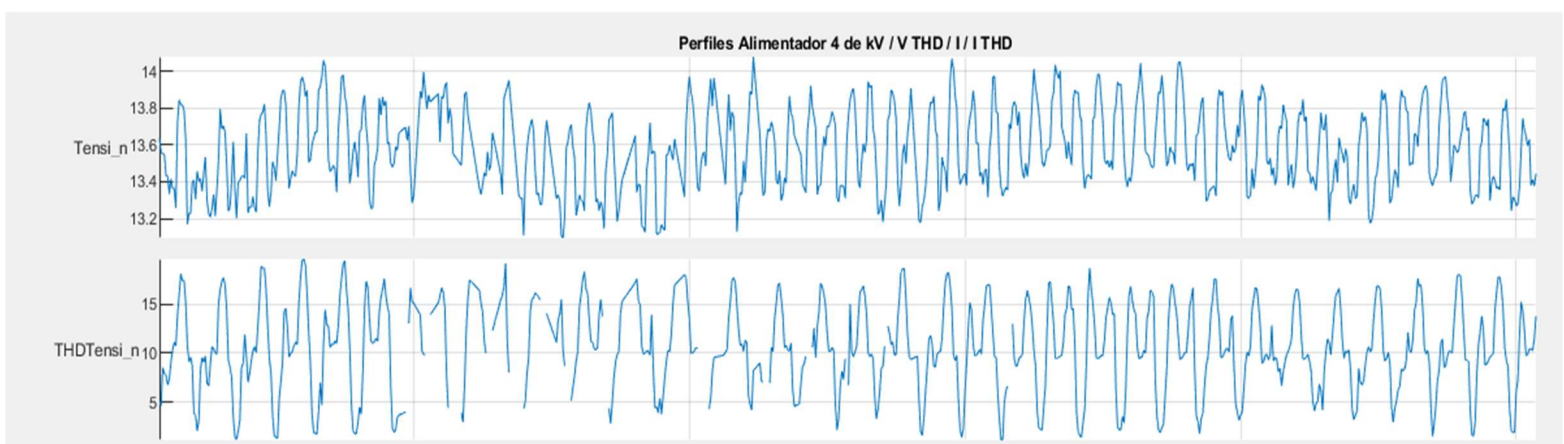
La celda del alimentador suministra energía a un sector compuesto por múltiples sub-áreas con un total aproximado de 1445 motores, las (Tablas 2.3 y 2.4) muestran los valores tomados de la medición del alimentador #2.

	TENSIÓN LÍNEA - LÍNEA			CORRIENTE TRIFÁSICA		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	14.08	14.13	14.07	105.66	108.99	108.82
PROMEDIO	13.58	13.60	13.57	73.72	76.49	75.85
MÍNIMO	13.10	13.09	13.06	13.01	14.61	13.45

Tabla 2.3 Datos de medición Tensión y Corriente - Alimentador #2.

	THD TENSIÓN			THD CORRIENTE		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	19.58%	17.92%	13.41%	145.02%	96.48%	102.87%
PROMEDIO	10.49%	9.58%	6.85%	32.76%	26.51%	24.64%
MÍNIMO	1.17%	1.08%	0.84%	19.04%	14.79%	13.71%

Tabla 2.4 Datos de medición THD Tensión y THD Corriente - Alimentador #2.



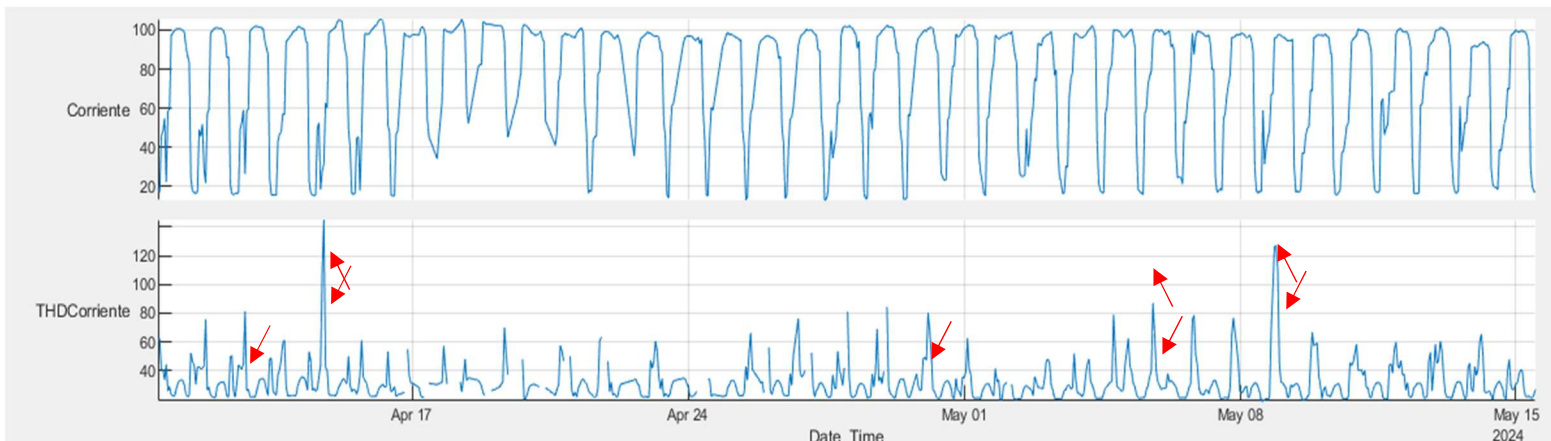


Figura 2.23 Gráficas mediciones Calidad de Energía – Alimentador #2

La (Figura 2.23) se evidencia que los niveles de THD-I mantienen niveles altos cuando hay poca presencia de demanda energética, con promedios entre 24% y 33%. Es notable que incluso en condición de mínima carga, el THD-I no baja del 13.7%, lo que sugiere que el fenómeno armónico es constante e independiente de la potencia activa demandada.

2.3.2 Sistema Eléctrico de Baja Tensión.

Los valores presentados en esta sección corresponden a las mediciones realizados en los tableros de distribución ubicados en los diferentes sectores operativos, el medidor de calidad de energía se realiza la conexión correspondiente de corriente y tensión como se muestra en la (Figura 2.24), para la lectura de energía, estos datos de bajo de tensión permiten un diagnóstico detallado, aislando el impacto de grupos de cargas y evaluando fenómenos locales como el desbalance entre fases y la degradación de la calidad de energía.

Las mediciones sirven para evaluar y comparar el impacto en la calidad de energía de las dos tecnologías de motores presentes: los motores síncronos de imanes permanentes (PM) y los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM). Para ello se

seleccionaron tableros estratégicos que operan con cargas de cada tecnología, así como puntos diferentes de cada alimentador.

Los parámetros medidos; tensión, corriente, potencia aparente, factor de potencia y distorsión armónica total (THD), permiten evaluar la calidad de suministro de energía de cada tecnología. Los resultados obtenidos proporcionan la evidencia necesaria para identificar la fuente primaria de armónicos.

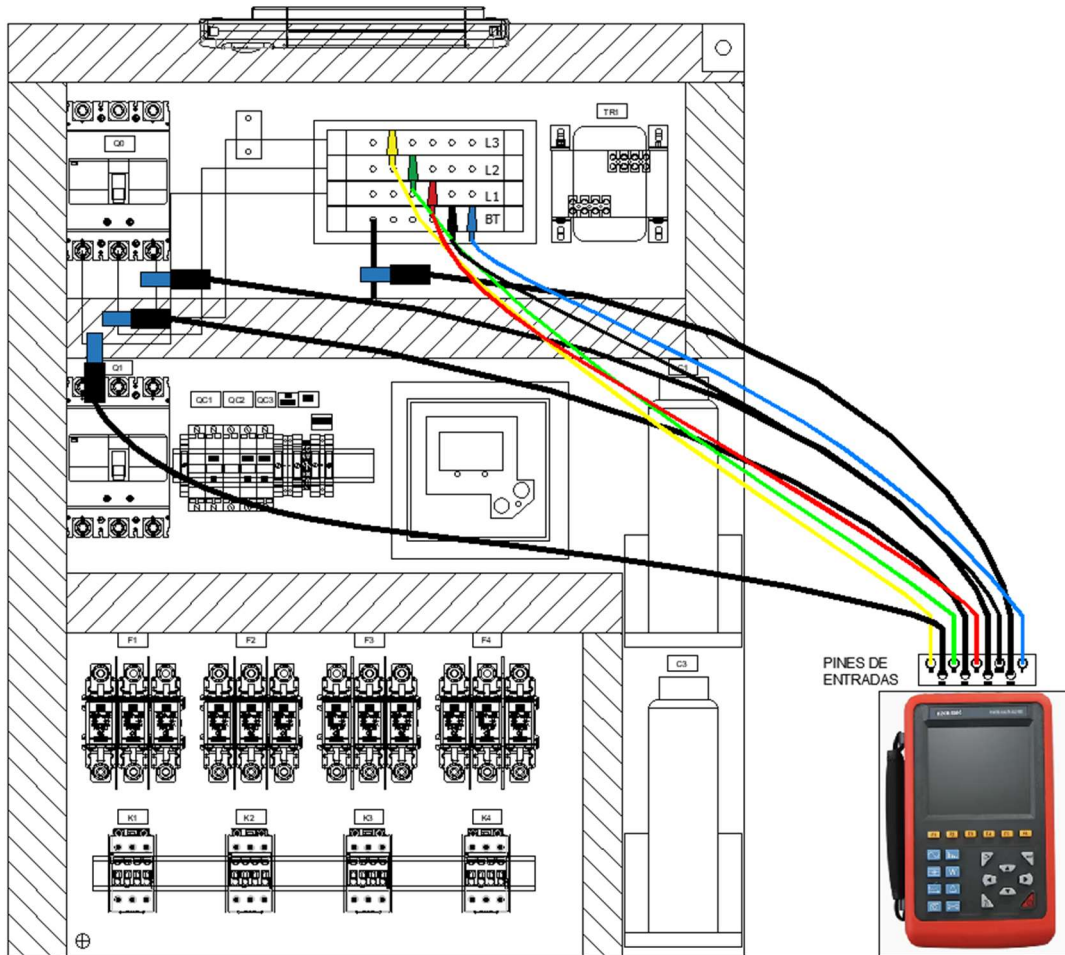


Figura 2.24 Conexión de Medidor Calidad de Energía al Tablero de Distribución.

2.3.2.1 Campamento #1.

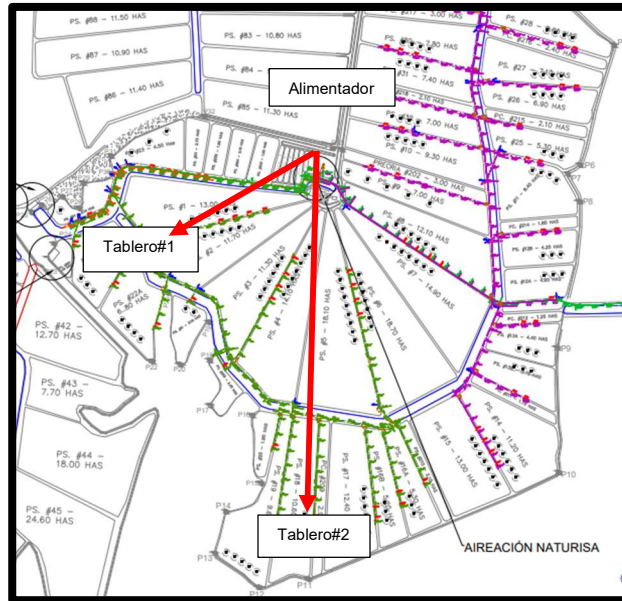


Figura 2.25 Plano Georreferencial de la Camaronera

➤ Tablero #1

Ubicado en una zona de piscinas, este tablero controla 9 motores de 3 HP con tecnología de alta eficiencia (PM).

	TENSIÓN LÍNEA - LÍNEA			CORRIENTE TRIFÁSICA		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	474	472	476	36.6	37.7	37.7
PROMEDIO	458.18	454.54	459.11	23.72	24.09	24.23
MÍNIMO	439	435	440	0.17	0.15	0

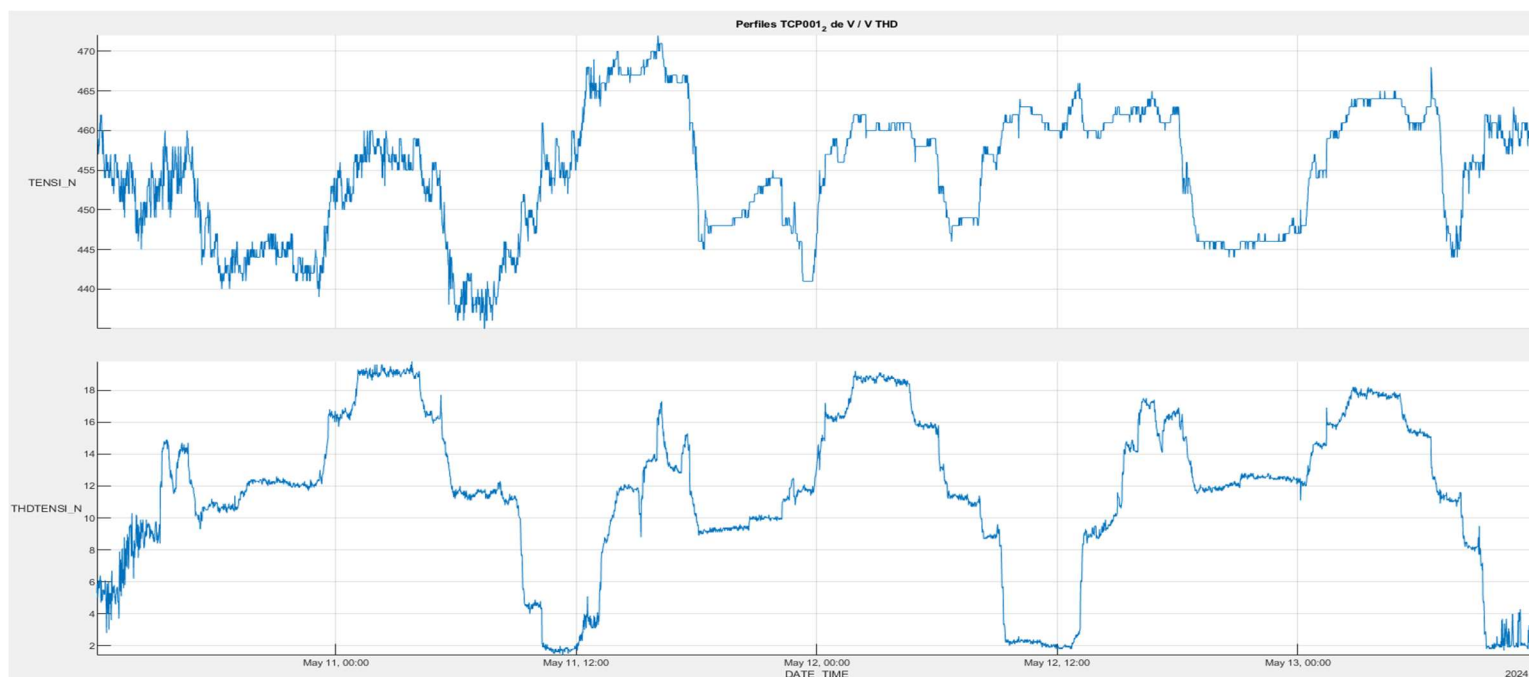
Tabla 2.5 Datos de medición Tensión y Corriente - Tablero #1.

	THD TENSIÓN			THD CORRIENTE		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	15.70%	19.80%	17.00%	52.90%	73.40%	16.80%
PROMEDIO	9.33%	11.54%	10.00%	20.95%	24.36%	6.93%
MÍNIMO	1.20%	1.40%	1.30%	8.40%	8.50%	0.00%

Tabla 2.6 Datos de medición THD Tensión y THD Corriente - Tablero #1.

	POTENCIA kVA	FACTOR DE POTENCIA
MÁXIMO	28.87	0.976
PROMEDIO	18.91	0.78
MÍNIMO	0.08	0.307

Tabla 2.7 Datos de medición Potencia y Factor de Potencia - Tablero #1.



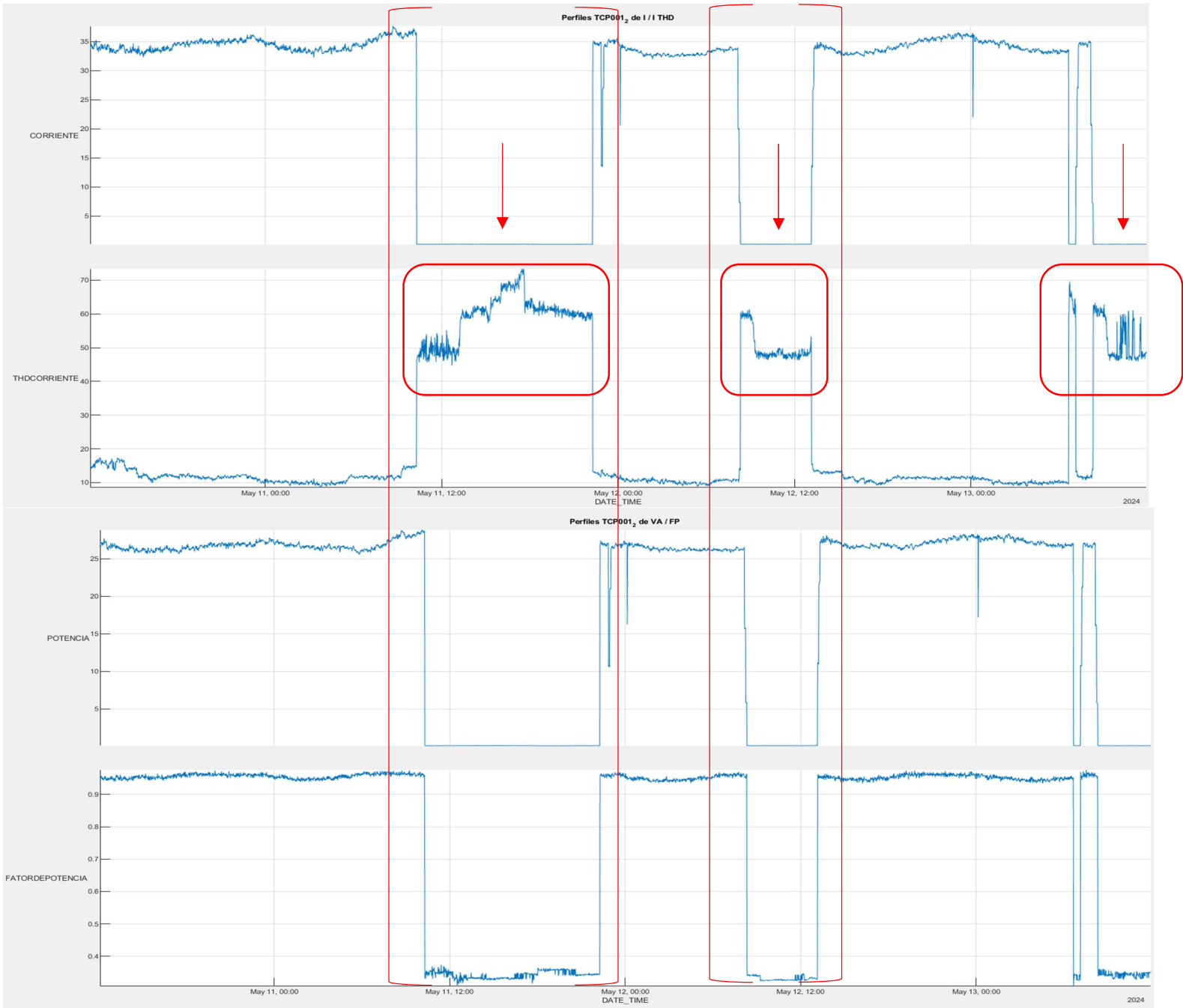


Figura 2.26 Gráficas mediciones Calidad de Energía – Tablero #1

En la (Tabla 2.6) se evidencia una gran variabilidad en el THD de corriente entre fases (promedio de 6.93% en L3 vs 24.36% en L2) cuando la carga es casi nula, indicando un desbalance significativo en la generación de armónicos. El factor de potencia que se

muestra en la (Tabla 2.7), fluctúa ampliamente entre 0.307 a 0.976, correlacionándose con los ciclos de encendido y apagado de los motores.

➤ Tablero #2

Ubicado en una zona distante del punto de alimentación principal, este tablero opera 9 motores del mismo tipo de tecnología de alta eficiencia (PM).

	TENSIÓN LÍNEA - LÍNEA			CORRIENTE TRIFÁSICA		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	475	472	477	34.5	34	34.8
PROMEDIO	455.79	453.99	458.64	19.07	18.94	19.22
MÍNIMO	440	439	442	0.22	0.21	0

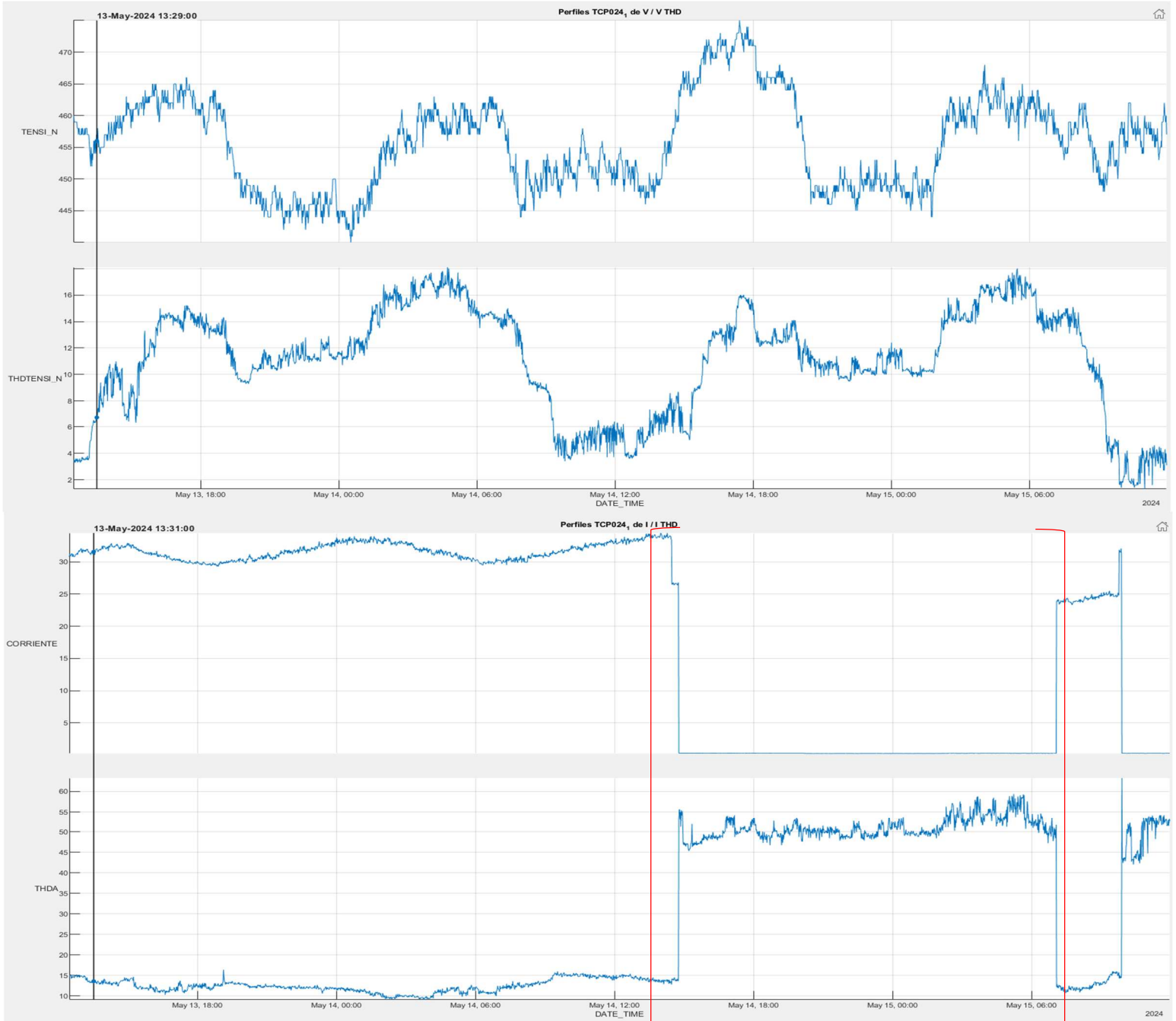
Tabla 2.8 Datos de medición Tensión y Corriente - Tablero #2.

	THD TENSIÓN			THD CORRIENTE		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	18.10%	18.30%	15.10%	63.30%	65.80%	15.40%
PROMEDIO	11.08%	10.86%	9.18%	27.39%	27.38%	7.31%
MÍNIMO	1.30%	1.40%	1.20%	9.10%	7.50%	0.00%

Tabla 2.9 Datos de medición THD Tensión y THD Corriente - Tablero #2.

	POTENCIA kVA	FACTOR DE POTENCIA
MÁXIMO	26.98	0.97
PROMEDIO	15	0.68
MÍNIMO	0.1103	0.23

Tabla 2.10 Datos de medición Potencia y Factor de Potencia - Tablero #2.



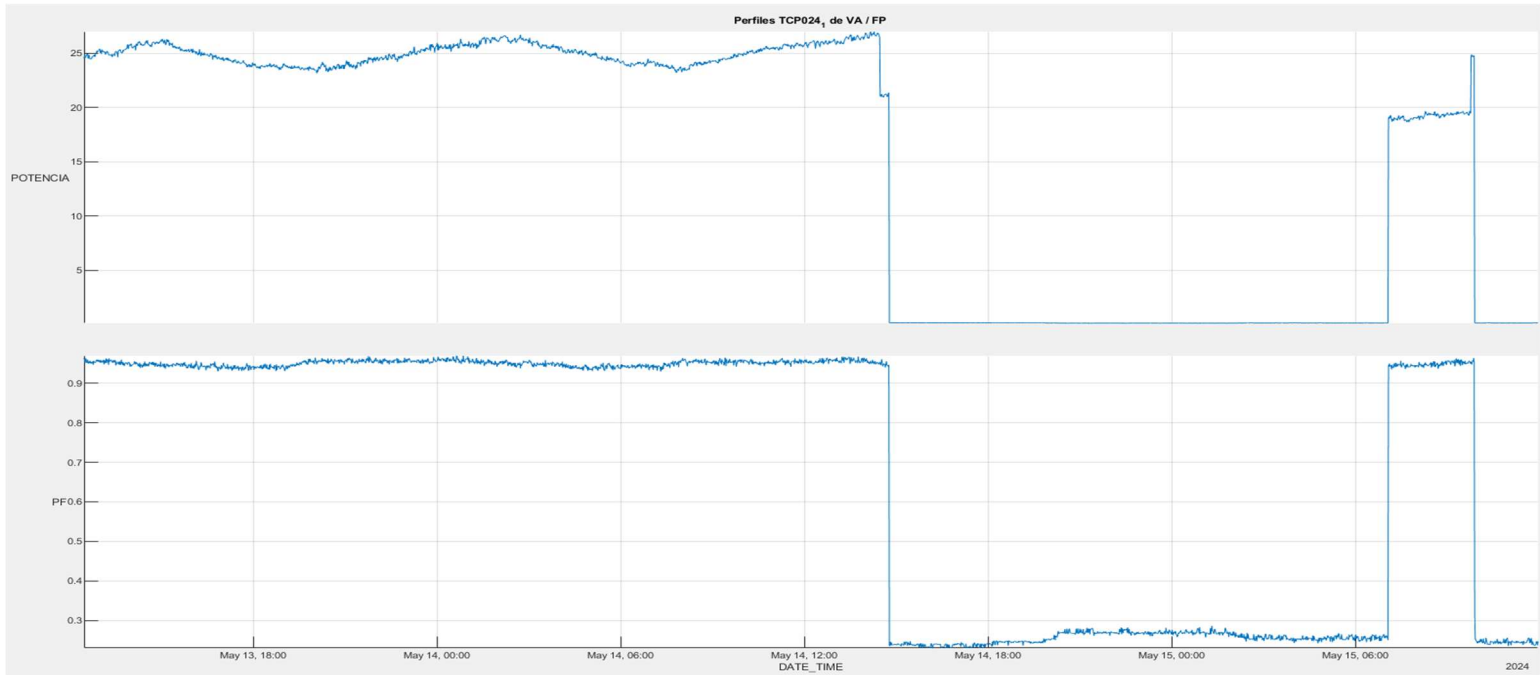


Figura 2.27 Gráficas mediciones Calidad de Energía – Tablero #2

Con estos resultados que se muestra en la (Figura 2.27), se confirma que el patrón de desbalance armónico en la (Tabla 2.9), siendo la fase L3 la menos distorsionada. Al comparar con el “Tablero #1” del mismo campamento, se observa que este tablero. Al estar más lejos de la fuente, presenta un THD de tensión promedio ligeramente mayor del ($\approx 10.4\%$ vs $\approx 10.3\%$).

2.3.2.2 Campamento #2.

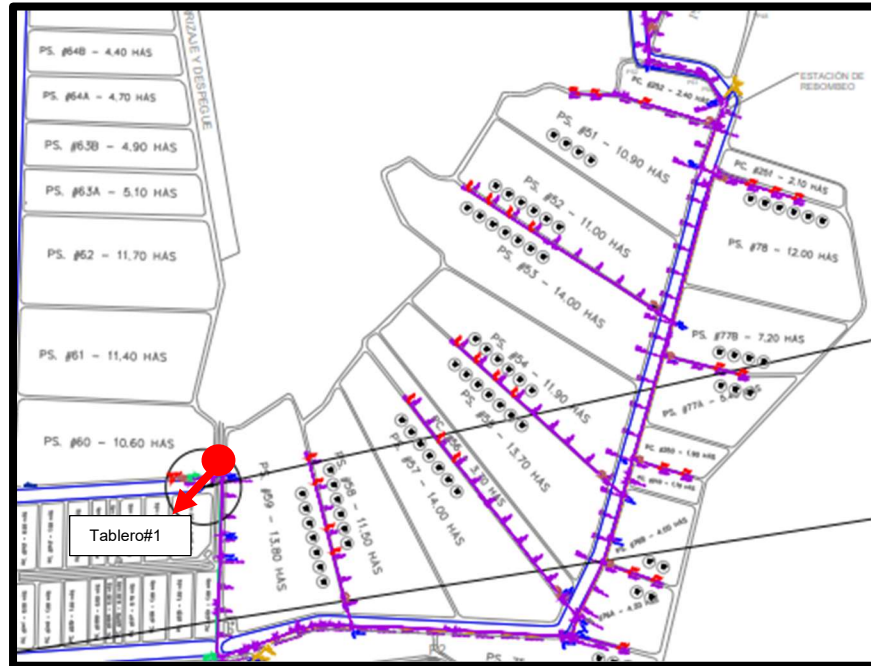


Figura 2.27 Plano Georreferencial de la Camaronera

➤ Tablero #1

El tablero, ubicado en una zona de Pre-cría, opera 67 motores de 2 HP con tecnología de inducción estándar (SCIM).

	TENSIÓN LÍNEA - LÍNEA			CORRIENTE TRIFÁSICA		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	483	482	477	108	103	106
PROMEDIO	460.18	459.1	455.38	95.22	91.18	94.5
MÍNIMO	442	439	437	87.6	82.9	87.4

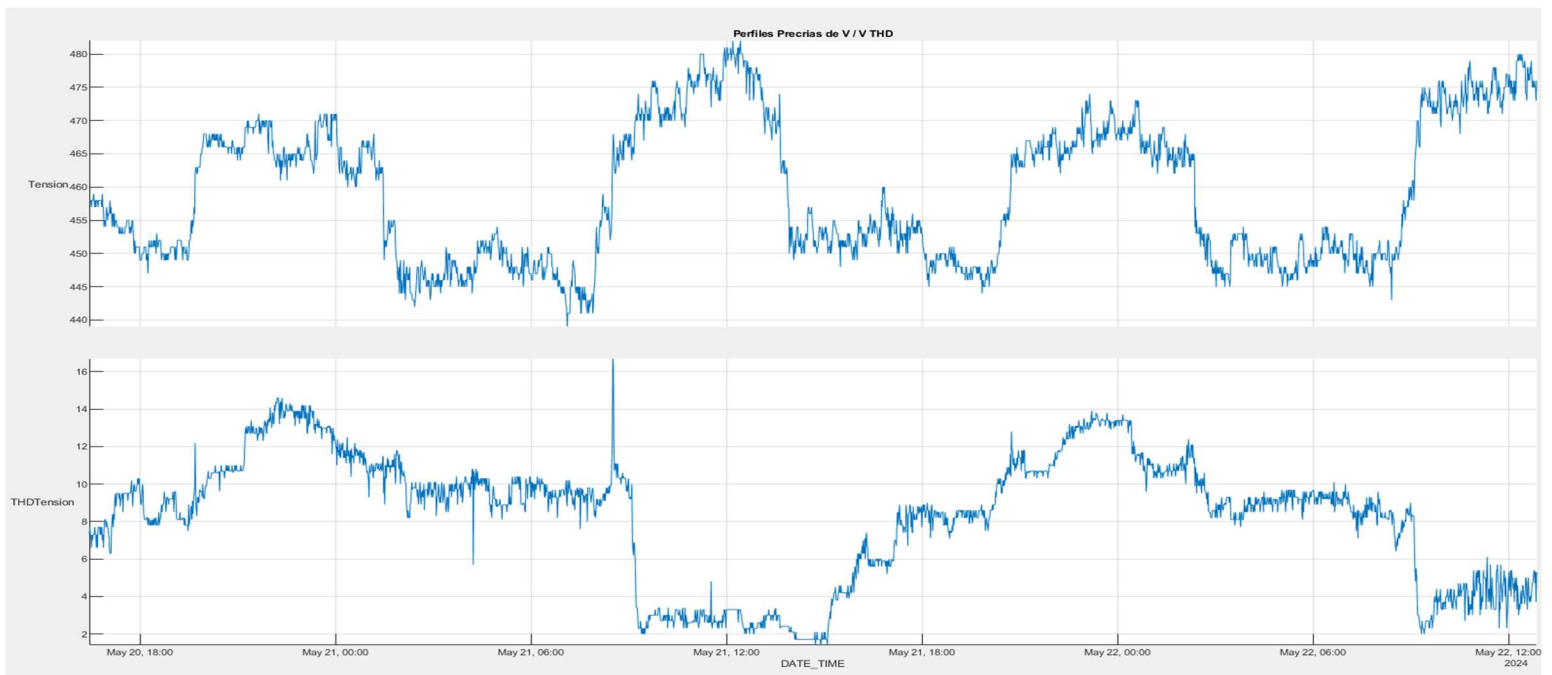
Tabla 2.11 Datos de medición Tensión y Corriente - Tablero #1.

	THD TENSIÓN			THD CORRIENTE		
	V1	V2	V3	L1	L2	L3
MÁXIMO	14.90%	16.70%	20.00%	12.70%	17.00%	11.10%
PROMEDIO	8.26%	8.32%	9.85%	7.18%	8.21%	6.38%
MÍNIMO	1.40%	1.40%	1.40%	1.50%	2.30%	1.50%

Tabla 2.12 Datos de medición THD Tensión y THD Corriente - Tablero #1.

	POTENCIA kVA	FACTOR DE POTENCIA
MÁXIMO	87.89	0.014
PROMEDIO	74.37	-0.007
MÍNIMO	66.26	-0.041

Tabla 2.13 Datos de medición Potencia Aparente y Factor de Potencia - Tablero #1.



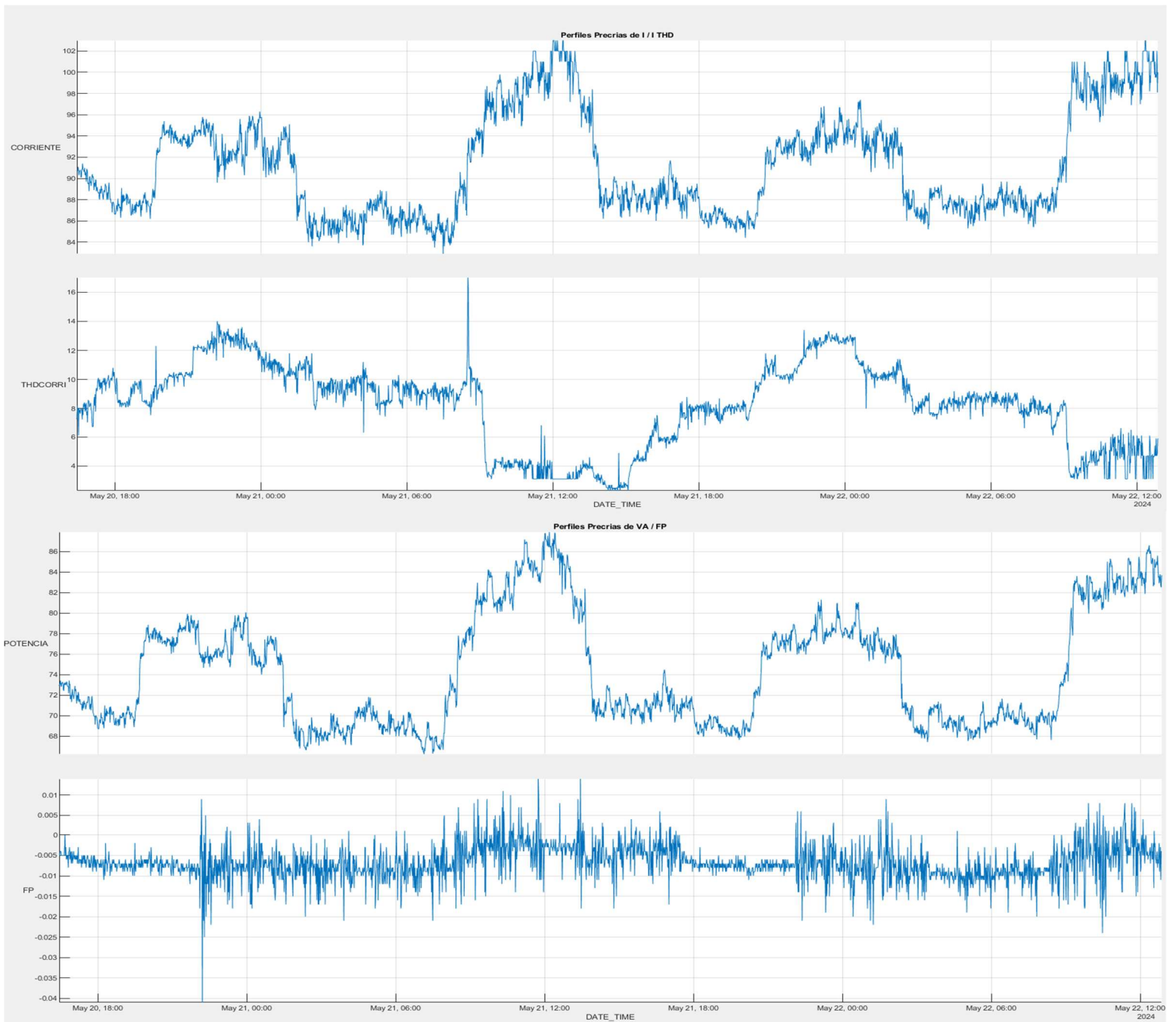


Figura 2.28 Gráficas mediciones Calidad de Energía – Tablero #1

Con estos resultados la (Figura 2.28), presenta un perfil notablemente diferente a los anteriores. La corriente de carga es mucha mayor y constante (mínimo de 82.9 A), reflejando una operación continua. Los niveles de THD (Tabla 2.13), tanto de tensión como de corriente (Tabla 2.12), son significativamente menores (THD-I promedio <8.5%) que en los tableros con motores de alta eficiencia (PM), a pesar de manejar más potencia. Esto corrobora que la tecnología del motor y su método de control son factores determinantes en la generación de armónicos.

2.3.2.3 Espectros Armónicos THD de los motores.

➤ Motor SCIM

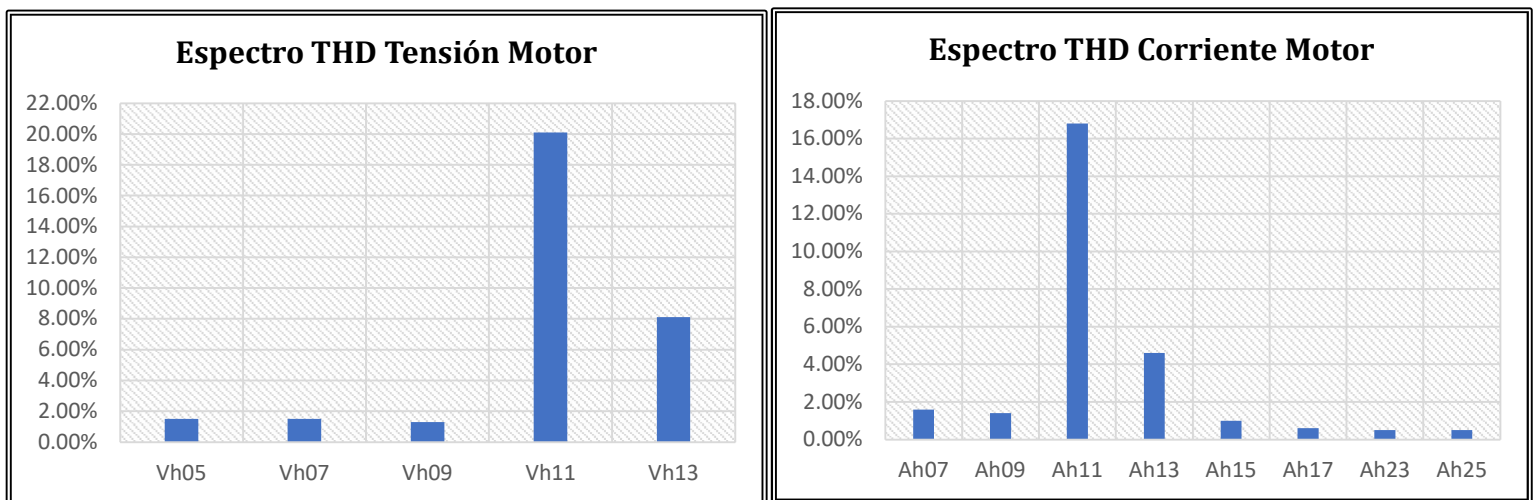


Figura 2.29 Gráficas Espectros Armónicos de Tensión y Corriente Motor SCIM

➤ Motor PM

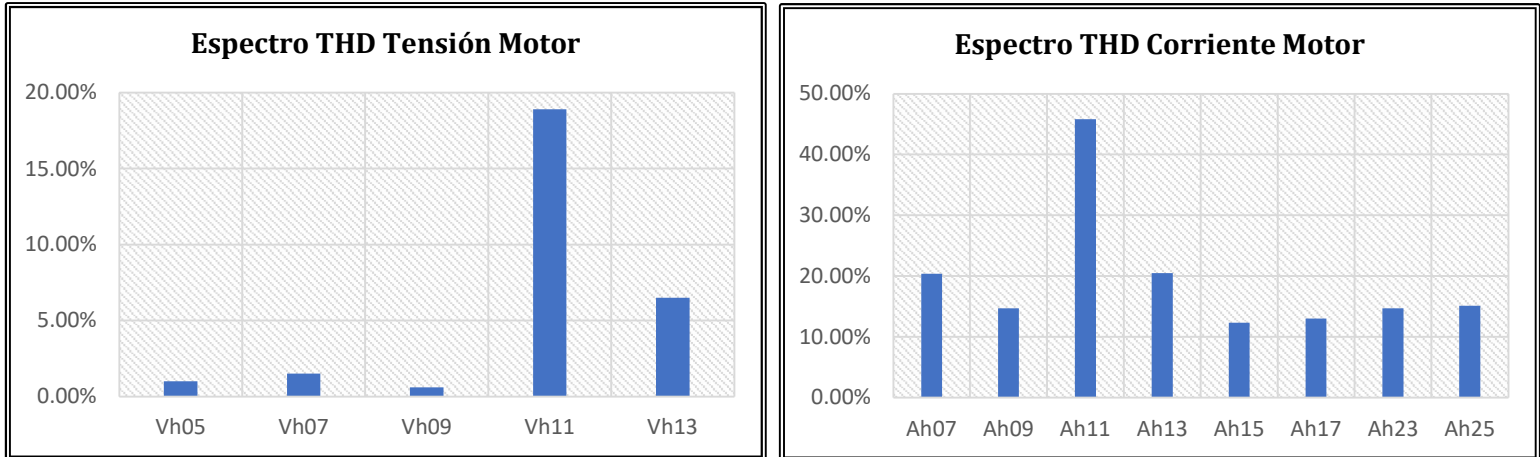


Figura 2.30 Gráficas Espectros Armónicos de Tensión y Corriente Motor PM

ESPECTROS ARMÓNICOS					
TENSIÓN					
Tablero	Vh05	Vh07	Vh09	Vh11	Vh13
PM	1.00%	1.50%	0.60%	18.90%	6.50%
PM	1.20%	1.10%	0.60%	18.60%	8.00%
SCIM	1.50%	1.50%	1.30%	20.10%	8.10%

Tabla 2.14 Valores de Niveles Armónicos Tensión (5°, 7°, 9°, 11°, 13°)

ESPECTROS ARMÓNICOS								
CORRIENTE								
Tablero	Ah07	Ah09	Ah11	Ah13	Ah15	Ah17	Ah23	Ah25
PM	20.40%	14.70%	45.80%	20.50%	12.30%	13.00%	14.70%	15.10%
PM	15.20%	12.20%	40.50%	15.20%	14.10%	9.30%	10.60%	14.30%
SCIM	1.60%	1.40%	16.80%	4.60%	1.00%	0.60%	0.50%	0.50%

Tabla 2.15 Valores de Niveles Armónicos Corriente (7°, 9°, 11°, 13°, 15°, 17°, 23°)

CAPÍTULO III

3. RESULTADO Y ANÁLISIS

A partir de los datos de medición obtenidos en tableros de distribución que alimentan cargas de cada tecnología, como objetivo principal tiene en evaluar y contrastar el impacto real en la calidad de energía en los motores utilizadas en la industria acuícola: los motores Síncronos de Imanes Permanentes (PM) y los motores de Inducción de Jaula de Ardilla (SCIM). Se busca establecer una relación cuantitativa entre el tipo de motor y los principales indicadores de perturbaciones en el sistema eléctrico, tales como la Distorsión Armónica Total (THD) y el comportamiento del factor de potencia.

3.1 Metodología de Análisis

Para este caso de estudio, se analizaron 3 tableros que son alimentados de baja tensión (440 V).

1. Tablero PM_1: Opera 9 motores modelo PM de 3HP, ubicado a una menor distancia del alimentador.
2. Tablero PM_2: Opera 9 motores modelo PM de 3HP, ubicado a una mayor distancia del alimentador.
3. Tablero SCIM: Opera 67 motores modelo SCIM de 2HP.

Los datos se recopilaron durante periodos de 7 días constantes, mediante un analizador de redes trifásicos, capturando valores promedios, máximos y mínimos de tensión, corriente, factor de potencia y THD de tensión y corriente.

3.1.1 Resultados mediciones de los motores.

Parámetro	Tablero PM_1	Tablero PM_2	Tablero SCIM	Conclusión Comparativa
Factor de Potencia (FP) Prom.	0.78	0.846	0.863	Los SCIM presentan un FP natural más alto y estable. Los PM muestran un FP promedio más bajo y variable.
Rango de FP (Mín - Máx)	0.307 - 0.976	0.268 - 0.968	0.852 - 0.892	Variabilidad Extrema en PM vs. Estabilidad en SCIM. El FP de los PM fluctúa ($\Delta > 0.65$), reflejando sus ciclos de encendido/apagado y el efecto de sus controles electrónicos. El FP de los SCIM es notablemente estable ($\Delta \sim 0.04$).
THD de Tensión (V) Prom.	10.30%	10.40%	8.80%	La tensión en los tableros PM está más distorsionada. Aunque todos superan el 5%, la red que alimenta a SCIM presenta una calidad de tensión ligeramente mejor.
THD de Corriente (I) Prom.	17.40%	13.70%	7.30%	Los motores PM generan en promedio el DOBLE de distorsión armónica de corriente que los motores SCIM, a pesar de manejar una potencia activa total mucho menor.
THD de Corriente (I) PICO	73.40%	65.80%	17.00%	Los picos de distorsión en los PM son más altos ($\geq 65\%$), indicando eventos transitorios o resonancias que multiplican los armónicos. Los SCIM no presentan este comportamiento disruptivo.

Tabla 3.1 Tabla comparativa de motores SCIM y PM

Tablero (Tecnología)	THD-V Prom.	THD-I Prom.	Armónicos Dominantes (Corriente)	Interpretación y Causa del Nivel
Tablero PM_1	10.30%	17.40%	11° (45.8%), 13° (20.5%), 7° (20.4%)	Nivel ALTO. Patrón clásico de convertidores de 6 pulsos (VFDs). El 11° armónico es extremadamente prominente (>45%), lo que sugiere posibles condiciones de resonancia o una gran cantidad de drives con sus armónicos alineados en fase. Es la fuente más contaminante.
Tablero PM_2	10.40%	13.70%	11° (40.5%), 13° (15.2%), 7° (15.2%)	Nivel ALTO, pero menor que "Tablero PM_1". Mismo patrón de convertidor, pero con magnitudes menores, armónico es extremadamente prominente (>45%),
Tablero SCIM	8.80%	7.30%	11° (16.8%), 13° (4.6%)	Nivel MODERADO/BAJO. El 11° armónico sigue presente, pero a un nivel significativamente reducido. Su origen NO son los motores SCIM en sí, sino la contaminación de la tensión de red (THD-V 8.8%) proveniente de otros tableros con PM. Los motores SCIM, al ser cargas lineales en estado estable, consumen una corriente distorsionada porque la tensión que los alimenta ya está distorsionada. Esto es un efecto de propagación, no de generación.

Tabla 3.2 Tabla comparativa de motores SCIM y PM

Los altos niveles de armónicos se deben a la operación de los rectificadores de diodos o tiristores dentro de los VFDs. Un convertidor de 6 pulsos teóricamente genera armónicos de corriente de orden $h = n * p \pm 1$, donde $p=6$ (pulsos). Esto explica la existencia de los órdenes 5°, 7°, 11°, 13°, 17°, 19°, claramente observado en los datos de las (Figuras 2.29 y 2.30).

En los resultados (Tablas 2.14 y 2.15), se puede observar diferentes datos entre los tableros PM-1 y PM-2, aunque ambos tableros operan 9 motores de PM, existe una alta cantidad en el THD-I (17.4% y 13.7%), y en la magnitud del 11° armónico (45.8% y 40.5%) es crítica. Esto refleja que no todos los VFDs son iguales o no operan en las mismas

condiciones. Estos tableros podrían estar experimentando un fenómeno de resonancia paralela donde la impedancia del sistema (transformadores), y los bancos capacitores crean un circuito sintonizado cerca de la frecuencia 11° armónico (660 HZ),

Las mediciones recopiladas de los motores SCIM dio como resultado que el THD-I es del 7.3% es prácticamente igual al THD-V al 8.8%, ajustado por el factor de potencia de la carga. Con estos datos se confirma que los motores SCIM no generan armónicos propios significativos. No obstante, su nivel es alto solo porque operan en una red ya contaminada por los motores PM.

3.1.2 Implicaciones de los pasos fijos en la compensación reactiva.

En la camaronera se realiza la práctica de mantener un paso fijo de 5 kVAR permanente conectado en cada tablero capacitor, esta acción tiene como objetivo en compensar la corriente inductiva del transformador reductor asociado a cada piscina, en la cual está presente incluso cuando los motores están desconectados. Sin embargo, esta estrategia introduce una distorsión en la lógica de control del factor de potencia (FP), cuyos efectos son diferenciados según la tecnología del motor.

Intención vs Realidad en Vacío: El objetivo es evitar que se degrade el FP global de la instalación cuando el transformador este en estado vacío. No obstante, en la práctica real, este paso fijo actúa como una fuente incontrolable de potencia reactiva capacitiva. Durante los prolongados periodos de baja carga u operación mínima de los motores, estos 5 kVAR no encuentran una carga inductiva que compensar, generando un excedente neto de kVAR capacitivos.

Efectos en los motores SCIM: estos motores mantienen una carga constante predominante inductiva (FP estable 0.86), los 5 kvar fijos son, en gran medida, absorbidos por la demanda de los propios motores durante su operación normal. Esto a veces puede producir una ligera elevación de la tensión, que dada la baja distorsion armonica (THD-I 7.3%), es un efecto generalmente manejable.

Efectos en los motores PM: dichos motores tienden a presentarse a periodos extensos de carga mínima o nula, a esto los 5 kVAR fijos operan en un escenario de casi vacío, inyectando reactivos al sistema sin oposición, debido a esto, se genera una

sobrecompensación sostenida. Este exceso de tensión no solo incrementa la corriente fundamental a través de las botellas, sino que modifica la impedancia del punto de acoplamiento, alterando las condiciones de resonancia y amplificando ciertos armónicos generados por los VFDs, como se observa en los niveles extremos del 11° armónico.

3.1.3 Análisis de fallas reportadas

Los niveles armónicos medidos explican directamente fallas reportadas.

Daño en botellas capacitivas: Suponiendo que la corriente total (I_{rms}) en un tablero capacitor de los motores PM es de 12A y un THD del 45.8% solo para el 11° armónico, la corriente armónica supera los 5.5A, la corriente excedería a los 14A, teniendo una sobre corriente >30% respecto a su nominal, causando un sobrecalentamiento. En cambio, para los motores SCIM con un THD-I del 7.3%, el mismo calculo muestra una sobre corriente mínima (<5%), lo que explica porque las fallas se concentran en los tableros que alimentan motores PM.

Daños en transformadores reductores: La pérdida de potencia por armónicos en el núcleo del transformador es proporcional a " $I_h^2 * h^2$ ", por ejemplo, el 11° armónico del motor PM, las perdidas serán $(5.5A)^2 * (11)^2 = 3.666$. Para el mismo armónico en el motor SCIM viene con una corriente armónica estimada menor, las perdidas serian $(1.5A)^2 * (11)^2 = 272$. Con estos resultados se comprueba que las pérdidas del transformador que alimenta al motor PM son 10 veces mayores solo por este armónico, justificando el sobrecalentamiento y falla reportados.

3.2 Análisis comparativo Tecno-Económico

Se analizarán 4 escenarios para un banco de 10 motores de 3 HP (22.4 kW totales) operando alrededor de 6000 horas/año, bajo la tarifa eléctrica de CNEL EP:

- **Alternativa A (SCIM Base)**

Los motores SCIM IE3 con arrancador convencional, se asume que la compensación reactiva (tablero capacitor) y los demás componentes del sistema son estándar.

- **Alternativa B (PM Base):**

Los motores PM de alta eficiencia con variador de frecuencia (VFD) estándar, genera altos niveles de THD que dañan capacitores y transformadores reductores.

- **Alternativa C (SCIM Optimizado):**

Implementar a los motores SCIM IE3 con Filtro Pasivo Sintonizado (FPS) para mitigación de armónicos. Esta configuración permite control de velocidad sin contaminar la red. Dicho filtro se lo instalaría en el tablero de capacitores como un modelo anti-armónicos.

- **Alternativa D (PM Mitigado):**

Implementar a los motores PM de alta eficiencia con VFD, equipado con un Filtro Activo (FA), esto permite la eliminación de armónicos generados por todos los VFDs del banco. Así mismo dicho filtro se lo instalaría en el tablero capacitor.

Componente / Concepto	Alt. A (SCIM Base)	Alt. B (PM Base)	Alt. C (SCIM + Filtro)	Alt. D (PM + Filtro Activo)
Sistema Motriz				
- 10 Motores SCIM IE3 (3HP)	\$4,500	-	\$4,500	-
- 10 Motores PM (IE5, 3HP)	-	\$10,000	-	\$10,000
- Tablero Arrancador	\$2,000	\$2,000	\$2,000	\$2,000
Sistema de Mitigación				
- Filtro Pasivo Sintonizado (30A)	-	-	\$2,500	-
- Filtro Activo (50A)	-	-	-	\$8,000
Infraestructura Eléctrica				
- Banco Capacitores Estándar (30 kVAr)	\$1,200	\$1,200	-	-
- Banco Capacitores Anti- Armónicos (30 kVAr)	-	-	\$2,000	\$2,000
- Instalación / Modificación Tableros	\$300	\$300	\$1,000	\$1,500
CAPEX TOTAL ESTIMADO	\$8,000	\$13,500	\$12,000	\$23,500

Tabla 3.3 Tabla de estimación de costos (CAPEX)

Teniendo los valores del CAPEX (Tabla 3.3), en el siguiente análisis se tomará en cuenta los valores estimados de la tarifa CNEL ~\$0.12/kWh; con una operación de 6000 h/año; realizando un mantenimiento preventivo anual.

Concepto	Alt. A (SCIM Base)	Alt. B (PM Base)	Alt. C (SCIM+Filtro)	Alt. D (PM+Filtro Activo)
Consumo Energético (kWh/año)				
- Potencia Promedio (kW)	18.5	16.8	16.1 (con control VFD)	15.4
- Energía Anual (kWh)	111,000	100,800	96,600	92,400
- Costo Energía Anual	\$13,320	\$12,096	\$11,592	\$11,088
Penalizaciones / Multas				
- Penalización por Bajo FP (<0.9)	\$300	-	-	-
- Sobreconsumo por Pérdidas Armónicas (5%)	-	\$605	-	-
Mantenimiento y Reposición				
- Mant. Motores y Arrancadores/VFD	\$300	\$400	\$500	\$600
- Reposición Botellas Capacitivas (c/ 2 años)	\$600	\$1,200 (c/ 1 año)	-	-
- Mantenimiento Filtro (Pasivo/Activo)	-	-	\$200	\$500
OPEX TOTAL ANUAL ESTIMADO	\$14,520	\$14,301	\$12,292	\$12,188

Tabla 3.4 Tabla de Estimación de Costos Operativos Anuales (OPEX)

3.2.1 Calculo de Rentabilidad.

Se aplicarán los indicadores financieros estándares para un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento del 8% (costo capital típico).

3.2.1.1 Costo Total de Propiedad (TCO -10 años).

$$TCO = CAPEX + \sum_{n=1}^{10} \frac{OPEX_{ANUAL}}{(1 + tasa)^n} \quad (3.1)$$

Se reemplaza los valores obtenidos de (Tablas 3.3 y 3.4) de cada alternativa por la ecuación (3.1):

- **ALT. A:** \$8,000 + \$97,430 = ~\$105.430
- **ALT. B:** \$13.500 + \$90.586 = ~\$104.086
- **ALT. C:** \$12,000 + \$80.521 = ~\$92.521
- **ALT. D:** \$23,500 + \$157.687 = ~\$181,187

Con los resultados del TCO permiten una comparación robusta y con base financiera:

La alternativa con menor TCO es la más económica a largo plazo. En este caso, la Alternativa C (SCIM Optimizado) tiene el TCO más bajo (\$92.521), a pesar de no tener el CAPEX más bajo. Esto demuestra que su mayor inversión inicial se ve ampliamente compensada por sus menores costos operativos anuales principalmente por ahorro energético y eliminación de costos por daños.

En cambio, la alternativa B (PM Base) confirma ser la peor decisión a largo plazo, con el TCO más alto, validando que los costos por los armónicos anulan los ahorros por eficiencia.

3.2.1.2 Valor Actual Neto (VAN).

El VAN es un indicador financiero que calcula el beneficio neto para evaluar la rentabilidad del proyecto de inversión, es la decisión de migrar desde la tecnología base (Alternativa A y B) hacia una de las alternativas de mejora (Alternativa C y D).

Regla de decisión del VAN

- ✓ VAN > 0: La inversión en la alternativa "X" es rentable, Crea valor por encima del costo de capital.
- ✓ VAN = 0: La inversión solo alcanza a remunerar el capital al 8%.
- ✓ VAN < 0: La inversión no es rentable. No se recupera el costo de oportunidad del capital.

La alternativa C (SCIM + Filtro) es la que mostro el TCO más bajo. Se calculará para confirmar su rentabilidad.

Valores obtenidos

- CAPEX_ALT.A = \$8,000
- OPEX_ALT.A = \$14,820
- CAPEX_ALT.C = \$15,500
- OPEX_ALT.C = \$12.292
- $i = 0.08$
- $n = 10$

$$\text{Ahorro Anual}_C = \text{OPEX}_A - \text{OPEX}_C = \$14.520 - \$12.292 = \$2.228 \quad (3.2)$$

Mediante este cálculo de ahorro operativo anual referente a la Alternativa C, se demuestra que cada año, se ahorra \$2.228 como se muestra en la ecuación (3.2) en costos de operación (energía, mantenimiento, penalizaciones) comparando con la tecnología base Alternativa A.

3.2.1.3 Calculo de Inversión Incremental (Costo Neto)

$$\text{Inversion Incremental}_C = \text{CAPEX}_C - \text{CAPEX}_A = \$12.000 - \$8.000 = \$4.000$$

Para obtener los ahorros anuales, se debe invertir un adicional de \$4.000 sobre lo que costaría mantener la tecnología anterior.

Con esto se puede calcular el valor presente de los Ahorros Anuales (VP_Ahorros), dado que el ahorro es constante durante 10 años, se usa el Factor de Valor Presente de una Anualidad (FVPA).

$$\begin{aligned}
 FVPA(i, n) &= \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \\
 FVPA(8\%, 10) &= \frac{1 - (1 + 0.08)^{-10}}{0.08} \\
 FVPA(8\%, 10) &= \frac{1 - 0.463193}{0.08} = \frac{0.536807}{0.08} \approx 6.71008 \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VP_Ahorros_C &= Ahorro_Anual_C * FVPA(8\%, 10) \\
 VP_Ahorros_C &= \$2.228 * 6.71008 \approx \$14,954 \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

El VAN es la riqueza neta creada por la inversión.

$$\begin{aligned}
 VAN_C &= VP_{Ahorros_C} - Inversion_{Incremental_C} \quad (3.5) \\
 &= \$14,954 - \$4,000 = \$10,954
 \end{aligned}$$

El valor del VAN (3.5), es positivo y esto indica que la Alternativa C (SCIM optimizado) es una excelente inversión. Por cada banco de 10 motores, se esta creando \$10.954 de valor económico adicional, después de cubrir todos los costos y remunerar el capital invertido.

3.2.1.4 Periodo de recuperación de la inversión (Payback)

Esto permite medir el tiempo para recuperar la inversión del proyecto con el ahorro anual.

$$\text{Payback } ALT.C \text{ vs } ALT.A = \frac{(\$15.500 - \$8.000)}{(\$14.820 - \$12.292)} = 2.8 \text{ años} \quad (3.6)$$

Con estos resultados (3.6) el Payback de 2.8 años significa que el ahorro anual que genera el nuevo sistema permitira recuperar completamente la inversion incremental en menos de 3 años.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En base a los resultados mostrados, se ha determinado de manera concluyente que la operación de motores síncronos de imanes permanentes (PM), a pesar de su alta eficiencia energética, provoca como fuente primaria de perturbaciones armónicas en el sistema eléctrico de baja tensión. Los datos de medición demuestran que estos motores, a través de sus controladores electrónicos de velocidad (VFDs7arrancadores suaves), generan niveles de distorsión armónica de corriente (THD-I) que promedian el 15.5% y alcanzan picos superiores al 65%, valores que exceden en valores de magnitud los generados por los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM) en condiciones de carga similar.

En bancos de capacitores la interacción entre la sobrecompensación reactiva por pasos fijos no desconectables y la inyección de corrientes armónicas de alta magnitud genera una condición operativa critica, causando su sobrecalentamiento, degradación dieléctrica y falla prematura.

En transformadores reductores, los armónicos de corriente, especialmente los de orden superior (5°, 7° y 11°), provocan un aumento exponencial de las pérdidas en el núcleo. Agregando al estrés dieléctrico por sobretensión durante periodos de sobrecompensación, este fenómeno conduce un sobrecalentamiento y degradación acelerada del aislamiento, reduciendo la vida útil del equipo y posibles fallas en los devanados del transformador.

La rentabilidad de invertir en motores SCIM con filtro pasivo se considera como solución óptima, porque combina 3 criterios financieros claves: posee el menor Costo Total de Propiedad (TCO: \$94,481), genera el mayor Valor Actual Neto (VAN: +\$10,954) y presenta el periodo de recuperación de la inversión (Payback) más rápido (2.8 años). Con estos resultados se confirma con datos matemáticos que esta rentabilidad representa la mejor relación costo-beneficio, maximizando el retorno de la inversión y minimizando el riesgo financiero.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda desconectar el paso fijo de 5 kVAR en todos los tableros capacitores que alimenten principalmente los motores PM. La compensación de la corriente del transformador debe ser manejada por los pasos automáticos del controlador RTR.

Considerar los bancos de capacitores mejorar la protección, sustituyendo por las botellas dañadas con botellas más reforzadas “heavy duty”, diseñados para soportar niveles mayores de corriente armónica THD-I > 20%.

Realizar el reemplazo progresivo de transformadores reductores estándar que presentes sobrecalentamiento crónico, que tengan con un factor K nivel 4° o superior, diseñadas para soportar las pérdidas adicionales causadas por los armónicos.

Explorar la posibilidad de implementar un filtro pasivo sintonizado (FPS) en el tablero de distribución principal. El filtro debe estar diseñado para atenuar los armónicos dominantes principalmente 5°, 7° y 11°.

Invertir en un sistema de monitoreo continuo de calidad de energía, contar con medidores con comunicación permanente en puntos estratégicos. Esto permite un monitoreo en tiempo real, prevención de alertas tempranas y la toma de decisiones basados en los datos del sistema eléctrico. (Association, 2014)

BIBLIOGRAFÍA

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2014). *IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines — Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. <https://webstore.iec.ch/publication/5706>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2014). *IEEE Std 519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. <https://standards.ieee.org/ieee/519/2045/>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2019). *IEEE Std 1159-2019 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. <https://standards.ieee.org/ieee/1159/5936/>
- Akagi, H. (2017). Multilevel Converters and Harmonic Mitigation. En *Modern Power Electronics and AC Drives* (pp. 215-260). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Modern+Power+Electronics+and+AC+Drives%2C+2nd+Edition-p-9780130167439>
- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press. <https://ieeexplore.ieee.org/book/5233750>
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering Economy* (8th ed.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/engineering-economy-blank-tarquin/M9781259294447.html>
- Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/modern-power-electronics-and-ac-drives/P200000003380>
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2014). *Handbook for Aquaculture Water Quality*. Auburn University. <https://www.auburn.edu/academic/agriculture/fisheries/aquaculture/pdf/water-quality-handbook.pdf>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/electric-machinery-fundamentals-chapman/M9780073529547.html>
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2012). *Electrical Power Systems Quality* (3rd ed.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/electrical-power-systems-quality-dugan-mcgranaghan/M9780071761550.html>

- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2014). *Electric Machinery* (7th ed.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/electric-machinery-fitzgerald-kingsley/M9780073380469.html>
- Gieras, J. F. (2010). *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications* (3rd ed.). CRC Press. <https://www.routledge.com/Permanent-Magnet-Motor-Technology-Design-and-Applications-Third-Edition/Gieras/p/book/9781439810861>
- Krishnan, R. (2010). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Permanent-Magnet-Synchronous-and-Brushless-DC-Motor-Drives/Krishnan/p/book/9780824753849>
- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). The evolution of the blue aquaculture revolution. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 1-20. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/raq.12403>
- Bhattacharya, S., & Divan, D. M. (1995). Active filter solutions for utility interface of industrial loads. In *Proceedings of IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth* (Vol. 2, pp. 1078-1084). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/485455>
- Pillay, P., & Krishnan, R. (1989). Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(2), 265-273. <https://ieeexplore.ieee.org/document/34277>
- Singh, B., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Pandey, A., & Kothari, D. P. (1999). A review of single-phase improved power quality AC–DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(5), 962-981. <https://ieeexplore.ieee.org/document/793152>
- Singh, B., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Pandey, A., & Kothari, D. P. (2004). A review of single-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(5), 962-981. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1236159>
- Singh, B., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Pandey, A., & Kothari, D. P. (2015). A review of three-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), 641-660. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1510752>