



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**IMPLEMENTACIÓN DE IED'S EN LAS FUNCIONES DE
PROTECCIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE
INDUCCIÓN DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: EDISON XAVIER LOJA UCHUPAILLA.
CÉSAR ROLANDO CÓRDOVA VALVERDE**

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE MGTR.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, César Rolando Córdova Valverde con documento de identificación N^o 0106912587 y Edison Xavier Loja Uchupailla con documento de identificación N^o 0106308992 manifestamos que:


Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 12 de Febrero del 2026

Atentamente,



César Rolando Córdova Valverde
0106912587



Edison Xavier Loja Uchupailla
0106308992

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Edison Xavier Loja Uchupailla con documento de identificación N^o 0106308992 y César Rolando Córdova Valverde con documento de identificación N^o 0106912587, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico con enfoque investigativo: “IMPLEMENTACIÓN DE IED’S EN LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN DE MEDIA Y BAJA TENSION”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de Febrero del 2026

Atentamente,



Edison Xavier Loja Uchupailla
0106308992



César Rolando Córdova Valverde
0106912587

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “IMPLEMENTACIÓN DE IED’S EN LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN”, realizado por Edison Xavier Loja Uchupailla con documento de identificación N° 0106308992 y César Rolando Córdova Valverde con documento de identificación N° 0106912587, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de Febrero del 2026

Atentamente,

Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque
0102257482

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la fortaleza y perseverancia necesarias para culminar esta etapa académica.

Expreso mi agradecimiento al Ing. Flavio Quizhpi, quien se desempeñó como tutor del presente trabajo de titulación.

De manera muy especial, agradezco al Ing. Mateo Quizhpi por su guía constante, sus revisiones técnicas y su acompañamiento permanente durante todo el desarrollo del proyecto. Su orientación y apoyo fueron fundamentales para la correcta ejecución, implementación y validación experimental de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mi familia y a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a la culminación de este logro académico.

Edison Xavier Loja Uchupailla

Agradezco profundamente a Dios por darme vida, salud, sabiduría y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa académica.

A mi madre, aunque ya no esté físicamente conmigo, gracias por ser mi inspiración permanente y el motor que impulsa cada uno de mis logros.

A mi padre, abuelitos, hermanos y familiares, gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí y acompañarme en cada etapa de este proceso.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor, el Ing. Flavio Mateo Quishpi Cuesta, por su guía, paciencia y conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta investigación. Su orientación fue fundamental para la culminación de este trabajo.

Finalmente, agradezco a mis amigos y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron al cumplimiento de esta meta profesional.

César Rolando Córdova Valverde

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, pilar fundamental de mi vida y motor constante de superación. Su apoyo incondicional, sus consejos oportunos y su confianza en mis capacidades han sido la base que me permitió avanzar con firmeza en cada etapa de mi formación profesional.

A mis padres, por inculcarme valores como la responsabilidad, la perseverancia y el compromiso; a mis hermanos y seres queridos, por su acompañamiento y palabras de aliento en los momentos de mayor exigencia. Este logro también les pertenece, porque es el resultado del esfuerzo compartido y del amor que siempre me han brindado.

Edison Xavier Loja Uchupaila

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a Dios, por ser mi fortaleza, mi guía y la luz que ha iluminado cada paso de mi camino.

Al cielo, donde descansa mi madre, quien, aunque ya no me acompaña físicamente, permanece viva eternamente en mi corazón y en cada uno de mis logros. Este triunfo es también suyo, porque su amor incondicional, sus enseñanzas y su sacrificio fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante y a no rendirme ante las adversidades. Su recuerdo ha sido mi inspiración constante, y estoy seguro de que desde el cielo comparte conmigo la alegría de esta meta alcanzada.

A mi padre, abuelitos, hermanos y demás familiares, gracias por su apoyo constante, por sus consejos y por confiar siempre en mí. Este triunfo también les pertenece.

A mis amigos, por su compañía, motivación y palabras de aliento en los momentos más difíciles.

César Rolando Córdova Valverde

RESUMEN

Los motores de inducción son esenciales en la industria y representan la mayor parte del consumo eléctrico industrial. Debido a su alta demanda y a los diversos tipos de fallas eléctricas y mecánicas que pueden presentar, es indispensable contar con sistemas de protección confiables. En los últimos años, los Dispositivos Electrónicos Inteligentes se han convertido en la tecnología dominante para proteger motores, ya que integran funciones avanzadas de medición, análisis, comunicación y diagnóstico bajo estándares como IEEE, IEC y ANSI.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, no existe una metodología integral y estandarizada para ajustar y validar las funciones de protección de estos dispositivos en motores de media y baja tensión, especialmente en el contexto ecuatoriano. Esto provoca problemas como falta de coordinación, disparos falsos y fallas no detectadas, limitando la confiabilidad del sistema.

El presente trabajo se desarrolla una metodología técnica completa para la configuración y evaluación de las protecciones del IED's PowerLogic™ P5M30, basada en normas internacionales y validada mediante pruebas experimentales con equipos especializados como el OMICRON CMC 356 y un motor WEG W22 acoplado a un freno Pronic Siemens 1CH5. Esta metodología beneficiará a ingenieros, técnicos e investigadores, proporcionando una guía clara y estandarizada para mejorar la seguridad, eficiencia y continuidad operativa de los motores eléctricos en entornos industriales y académicos.

Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de ensayos mediante inyección secundaria y pruebas con carga mecánica real permite una validación integral y confiable de los esquemas de protección de motores eléctricos

ABSTRACT

Induction motors are essential in modern industry and represent the largest share of industrial electrical consumption. Due to their widespread use and exposure to various electrical and mechanical faults, reliable protection systems are crucial. In recent years, Intelligent Electronic Devices (IED's) have become the primary technology for motor protection, integrating advanced measurement, analysis, communication, and diagnostic capabilities under international standards such as IEEE, IEC, and ANSI.

Despite these advantages, there is no comprehensive and standardized methodology for configuring and validating protection functions in IED's applied to low- and medium-voltage induction motors, particularly within the Ecuadorian context. This gap leads to issues such as poor coordination, false trips, and undetected faults, compromising system reliability.

This research proposes the development of a complete technical methodology for configuring and evaluating IED's protection functions, based on relevant international standards and validated through experimental testing using equipment such as the OMICRON CMC 356 and a dynamometric test bench. The methodology will benefit engineers, technicians, and researchers by offering a clear and standardized approach to improving safety, efficiency, and operational continuity of electric motors in industrial and academic environments.

The results obtained demonstrate that the combination of secondary injection testing and tests with real mechanical load allows for a comprehensive and reliable validation of electric motor protection schemes.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Protección

IED's

Inducción

Metodología de protección

Fiabilidad

Industrial

ÍNDICE

1	MOTORES DE INDUCCIÓN Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	3
1.1	Introducción	3
1.2	Motores de inducción	4
1.3	Fallas en motores de inducción	4
1.3.1	Fallas eléctricas	5
1.3.2	Fallas mecánicas	6
1.4	Protección de motores de inducción	7
1.4.1	Evolución de los sistemas de protección de motores eléctricos	7
1.4.1.1	Protección convencional de motores eléctricos	7
1.4.1.2	Relés electromecánicos y estáticos	7
1.4.1.3	Relés digitales y numéricos	8
1.4.1.4	Sistemas de protección basados en IED's	8
1.5	Dispositivos electrónicos inteligentes IED's	9
2	NORMATIVAS TÉCNICA Y METODOLOGÍA EMPLEADA	10
2.1	Normativas Aplicadas	10
2.1.1	Normas complementarias	11
2.2	Funciones típicas de protección de motores eléctricos	11
2.3	Equipos y Softwares implementados	12
2.3.1	IED'S PowerLogic™ P5 Protection Relay Motor	12
2.3.2	Software eSetup Easergy Pro	14
2.4	Equipo Universal de Ensayos de Relés OMICRON CMC 356	14
2.4.1	Software Test Universe	15
2.4.2	Freno Pronic Siemens 1CH5	16
2.4.3	Motor de inducción WEG W22	19
3	IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE FUNCIONES DE PROTECCIONES	21
3.1	Parametrización de las funciones de protección para las pruebas experimentales mediante estándares IEEE:	21

3.2	Implementación de las funciones de protección para las pruebas experimentales en software especializado:	24
3.3	Validación de las funciones de protección a través de pruebas experimentales	26
3.3.1	Casos especiales	26
3.3.2	Ensayos de validación	27
3.3.3	Validación mediante el equipo OMICRON CMC 356	27
3.3.4	Validación mediante el motor WEG W22 acoplado con el freno pronic Siemens 1CH5	30
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
4.1	Introducción	33
4.2	TIEMPOS DE RESPUESTA	33
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
5.1	Conclusiones	37
5.2	Recomendaciones	39

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	IED'S PowerLogic™ P5M30	13
2.2	Equipo de ensayos Onmicron CMC 356	15
2.3	Freno Pronic Siemens 1CH5	16
2.4	Diagrama de par y potencia en relación al numero de revoluciones	17
2.5	Motor de inducción utilizado en las pruebas y su placa de características.	20
3.1	Interfaz del software <i>eSetup Easergy Pro</i>	25
3.2	Parametrización en el software <i>eSetup Easergy Pro</i>	28
3.3	Esquema de conexión del equipo OMICRON CMC356	28
3.4	Conexión del equipo OMICRON CMC 356 en laboratorios	29
3.5	Resultados del programa Test Universal para la función 59: Sobrevoltaje	29
3.6	Diagrama de conexión del motor en el software CADESIMU	30
3.7	Montaje del sistema de protección para la validación de la función 59	31
3.8	Respuesta de la función 59 de protección por sobrevoltaje	32

Índice de tablas

2.1	Funciones típicas de protección de motores para aplicaciones comerciales e industriales (IEEE 3004-8)	12
3.1	Funciones de protección de motores basadas en IEEE Std 3004.8	23
3.2	Criterios de ajuste y cálculos de funciones de protección con datos de placa del motor	24
4.1	Comparación entre criterios de ajuste y tiempos de respuesta obtenidos equipo OMICRON 356	34
4.2	Comparación entre criterios de ajuste y tiempos de respuesta obtenidos en el motor WEG W22	35
1	Áreas del Trabajo de Grado	43

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se centra en el estudio y aplicación de sistemas de protección para motores de inducción de bajo y medio voltaje mediante el uso de dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), considerando su importancia en la operación segura y confiable de los sistemas industriales modernos. Los motores de inducción constituyen uno de los equipos más utilizados en la industria, por lo que la implementación de esquemas de protección adecuados resulta fundamental para prevenir daños, reducir tiempos de indisponibilidad y optimizar la vida útil de los equipos eléctricos.

El objetivo principal de este trabajo es analizar y validar el desempeño de diversas funciones de protección aplicadas a un motor de inducción, utilizando un IED PowerLogic™ P5M30 como elemento central del sistema. A través de la correcta parametrización y evaluación de estas funciones, se busca comprobar su capacidad para detectar condiciones anómalas de operación y actuar de manera selectiva y coordinada, garantizando la integridad del motor y del sistema eléctrico asociado.

La metodología empleada combina el análisis teórico basado en normativa técnica vigente con la implementación práctica de un esquema de protección en un entorno controlado. Para ello, se realizó la configuración del IED mediante software especializado, la simulación de fallas eléctricas utilizando equipos de prueba secundarios y la ejecución de ensayos experimentales sobre el motor de inducción. Dichos ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de Máquinas Eléctricas y de Protecciones Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, lo que permitió evaluar la respuesta de las protecciones frente a distintos escenarios operativos. Este enfoque asegura una validación integral tanto a nivel funcional como operativo.

El desarrollo del trabajo se estructura en unidades temáticas que permiten abordar de manera ordenada y progresiva los distintos aspectos del estudio, iniciando con el

análisis de los principios de funcionamiento de los motores de inducción, sus principales componentes y las fallas eléctricas y mecánicas más comunes que afectan su desempeño y vida útil en entornos industriales. Posteriormente, se examina la evolución de los sistemas de protección de motores, desde esquemas convencionales hasta soluciones basadas en dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), resaltando las ventajas técnicas que estos ofrecen en términos de selectividad, confiabilidad, supervisión y capacidad de integración con sistemas de automatización.

En este contexto, el principal aporte de la presente investigación radica en la validación experimental de las funciones de protección de motores eléctricos mediante la comparación entre pruebas de inyección secundaria y ensayos con carga mecánica real. A diferencia de estudios puramente teóricos o de simulación, este trabajo evalúa el comportamiento dinámico de un IED comercial específico, el PowerLogic™ P5M30, frente a condiciones reales de operación, permitiendo identificar desviaciones prácticas en los niveles y tiempos de actuación que no se encuentran explícitamente cuantificadas en los estándares IEEE. De esta manera, se contribuye al fortalecimiento de criterios técnicos para la correcta parametrización y puesta en servicio de sistemas de protección de motores en entornos industriales reales.

CAPÍTULO 1

MOTORES DE INDUCCIÓN Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

1.1 Introducción

Los motores de inducción de bajo y medio voltaje constituyen uno de los elementos más importantes en los sistemas industriales modernos debido a su simplicidad constructiva, robustez mecánica y elevada eficiencia operativa. Estas máquinas son ampliamente utilizadas en procesos productivos continuos, sistemas de bombeo, ventilación, compresión y aplicaciones de torque constante, representando una proporción significativa del consumo energético industrial. De acuerdo con el estándar IEEE Std 3004.8-2016, los motores de inducción se caracterizan por su alta confiabilidad, bajos requerimientos de mantenimiento y capacidad de operar bajo condiciones variables de carga sin comprometer su estabilidad eléctrica y mecánica, lo que los convierte en una solución ampliamente adoptada en entornos industriales exigentes [1].

A pesar de estas ventajas, los motores de inducción están expuestos a diversas condiciones de operación de fallas eléctricas y mecánicas si no se dispone de esquemas de protección adecuados. Según IEEE Std 3004.8-2016, fenómenos como sobrecorrientes, desbalance de voltajes, fallas a tierra y sobrecalentamiento del estator y del rotor pueden acelerar la degradación del aislamiento y reducir considerablemente la vida útil del motor[1]. En este contexto, la aplicación de dispositivos de protección adecuados, particularmente mediante dispositivos electrónicos inteligentes IED's, permite detectar de forma temprana estas condiciones, mejorar la selectividad de las protecciones y garantizar una operación segura y confiable de los motores de inducción en sistemas industriales [2]

1.2 Motores de inducción

El motor de inducción es una máquina eléctrica de corriente alterna cuya función principal es convertir la energía eléctrica en energía mecánica mediante el fenómeno de inducción electromagnética. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético giratorio generado en el estator y las corrientes inducidas en el rotor, lo que produce un par electromagnético capaz de poner en movimiento el eje del motor. Este tipo de motor es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su alta confiabilidad, simplicidad constructiva y capacidad de operar de forma continua bajo condiciones variables de carga, sin requerir sistemas de excitación externos ni dispositivos de conmutación mecánica, lo que reduce significativamente el mantenimiento y los costos operativos [1].

El motor de inducción está compuesto principalmente por el estator, el rotor, el entrehierro, el eje, los rodamientos y el sistema de ventilación. El estator contiene los devanados trifásicos responsables de generar el campo magnético giratorio, mientras que el rotor, que puede ser de jaula de ardilla o bobinado, es el elemento donde se inducen las corrientes que permiten la producción del par mecánico. Componentes adicionales como los rodamientos y el sistema de enfriamiento garantizan una operación mecánica estable y un adecuado control térmico durante el funcionamiento. De acuerdo con la normativa IEEE 3004.8, la correcta interacción entre estos elementos es fundamental para asegurar un desempeño eficiente, minimizar pérdidas y prolongar la vida útil del motor, especialmente en aplicaciones industriales de bajo y medio voltaje [1].

1.3 Fallas en motores de inducción

Los motores de inducción de bajo y medio voltaje están sujetos a diversos tipos de fallas que afectan su desempeño, vida útil y disponibilidad operativa. De acuerdo con las normas IEEE Std 3004.8 [1] e IEEE Std C37.96 [3], estas fallas se clasifican en eléctricas y mecánicas, cada una con mecanismos de origen bien definidos que responden tanto a condiciones internas del motor como a factores externos del sistema eléctrico.

1.3.1 Fallas eléctricas

- **Sobrecarga térmica:** ocurre cuando el motor opera por encima de su corriente nominal durante un periodo prolongado, lo que incrementa la temperatura en los devanados del estator y del rotor, provocando el envejecimiento prematuro del aislamiento [4]. Según la norma NEMA MG-1 [5], por cada incremento de 10 °C en la temperatura de operación, la vida útil del aislamiento se reduce aproximadamente a la mitad.
- **Desequilibrio de fases:** una diferencia superior al 2% entre las corrientes o voltajes de fase genera una corriente de secuencia negativa, la cual circula en sentido contrario al campo giratorio, ocasionando pérdidas adicionales en el rotor y sobrecalentamiento localizado [6].
- **Pérdida de fase:** provocada por la apertura de un fusible, un conductor dañado o una conexión deficiente. Bajo esta condición, el motor continúa operando con corriente desbalanceada, lo que genera un rápido aumento de temperatura en las fases activas y una disminución del par disponible [7].
- **Sobrevoltaje y subvoltaje:** las variaciones de voltaje afectan directamente el flujo magnético. Un exceso de voltaje incrementa el flujo y puede saturar el núcleo, deteriorando el aislamiento; por el contrario, una subvoltaje reduce el torque y obliga al motor a consumir más corriente, generando sobrecalentamiento [8].
- **Bloqueo o estancamiento del rotor:** sucede cuando el rotor no gira, aunque el motor recibe energía. En estas condiciones, la corriente puede ser de 6 a 8 veces la nominal, produciendo un incremento térmico extremo que daña el bobinado si no se interrumpe la alimentación rápidamente [9].
- **Falla a tierra:** es una de las fallas más comunes y peligrosas. Se produce cuando una parte viva entra en contacto con el chasis o con el suelo, provocando corrientes residuales elevadas que pueden dañar el aislamiento y representar riesgo eléctrico [10].
- **Frecuencias anormales:** la variación de la frecuencia de suministro altera la velocidad sincrónica y el flujo magnético. Una subfrecuencia prolongada puede provocar sobrecalentamiento por reducción del torque. [8].

1.3.2 Fallas mecánicas

Aunque las fallas eléctricas son las más estudiadas, Béla Lipták indica que las fallas mecánicas representan una proporción significativa de los fallos totales en motores de inducción, especialmente en ambientes industriales exigentes. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Desalineación del eje:** Se produce cuando el eje del motor no está correctamente alineado con la carga acoplada como una bomba, un compresor o un ventilador. Genera vibraciones, esfuerzos axiales y radiales excesivos, acelerando el desgaste de rodamientos y acoplamientos.
- **Desbalance del rotor:** Puede deberse a defectos de fabricación, acumulación de material, deformaciones térmicas o daño en las barras del rotor. Provoca vibraciones, ruidos anormales y esfuerzos adicionales sobre los rodamientos.
- **Falla de rodamientos:** Es una de las fallas mecánicas más frecuentes. Los rodamientos pueden dañarse por lubricación deficiente, contaminación, sobrecarga o vibración excesiva. Este tipo de falla representa hasta el 40% de los fallos mecánicos en motores industriales.
- **Ejes doblados o deformados:** El exceso de carga o impactos mecánicos puede provocar desviaciones en el eje, alterando el centrado dinámico y causando vibraciones o roce entre el rotor y el estator.
- **Holgura o juego mecánico excesivo:** Debido al desgaste de cojinetes o acoplamientos, se produce un movimiento irregular del eje que genera pulsaciones de par y resonancias estructurales.
- **Desequilibrio de ventilación:** En motores TEFC, la obstrucción o daño del ventilador reduce la capacidad de enfriamiento, ocasionando sobretensión y degradación acelerada del aislamiento.

Estas fallas justifican la necesidad de implementar funciones de protección coordinadas, capaces de detectar y actuar ante condiciones anómalas, garantizando así la integridad del sistema y la continuidad operativa [11].

1.4 Protección de motores de inducción

1.4.1 Evolución de los sistemas de protección de motores eléctricos

Los sistemas de protección de motores eléctricos han experimentado una evolución significativa como consecuencia del desarrollo tecnológico, el incremento de la potencia instalada en procesos industriales y la necesidad de garantizar una operación segura y confiable. Desde esquemas de protección convencionales basados en dispositivos electromecánicos hasta sistemas avanzados implementados mediante Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED's), esta evolución ha permitido mejorar la confiabilidad, disponibilidad y supervisión de los motores eléctricos en aplicaciones industriales [12].

1.4.1.1 Protección convencional de motores eléctricos

En las primeras etapas de la industrialización, la protección de motores eléctricos se realizaba mediante dispositivos convencionales como fusibles, interruptores termomagnéticos, relés térmicos bimetálicos y contactores. Estos elementos estaban orientados principalmente a la protección contra cortocircuitos y sobrecargas prolongadas, actuando de manera local y sin capacidades de supervisión o comunicación [3].

Los fusibles proporcionaban una respuesta rápida ante corrientes de falla elevadas; sin embargo, carecían de selectividad y posibilidad de ajuste. Por su parte, los relés térmicos bimetálicos simulaban el calentamiento del devanado del motor y ofrecían protección frente a sobrecargas sostenidas. No obstante, estos dispositivos presentaban limitaciones importantes, como la imposibilidad de detectar fallas complejas tales como desequilibrios de fase, bloqueo de rotor o fallas a tierra incipientes, así como la ausencia de registro de eventos [13].

1.4.1.2 Relés electromecánicos y estáticos

Con el aumento de la potencia de los motores y la complejidad de los sistemas eléctricos, se introdujeron los relés electromecánicos de protección. Estos dispositivos permitieron implementar funciones más específicas, como la protección por sobrecorriente temporizada

y la detección de fallas a tierra, mejorando la coordinación de protecciones en instalaciones industriales [14].

Posteriormente, surgieron los relés estáticos, basados en circuitos electrónicos analógicos, los cuales ofrecían mayor rapidez y estabilidad en comparación con los relés electromecánicos. A pesar de estas mejoras, los relés estáticos presentaban limitaciones en cuanto a flexibilidad, capacidad de adaptación y comunicación, lo que restringía su aplicación en sistemas eléctricos modernos [15].

1.4.1.3 Relés digitales y numéricos

El avance de la microelectrónica y del procesamiento digital permitió el desarrollo de los relés digitales y numéricos, representando un punto de inflexión en la protección de motores eléctricos. Estos dispositivos incorporan microprocesadores que permiten implementar modelos térmicos más precisos y múltiples funciones de protección en un solo equipo [16].

Entre las funciones más relevantes se encuentran la protección por sobrecarga térmica, arranque prolongado, bloqueo de rotor, desequilibrio de corriente, pérdida de fase y detección de fallas a tierra sensibles. Además, los relés numéricos incorporan capacidades de registro de eventos, almacenamiento de oscilografías y diagnóstico, facilitando el análisis posterior de fallas y la optimización de las estrategias de mantenimiento [17].

1.4.1.4 Sistemas de protección basados en IED's

La etapa más avanzada en la evolución de la protección de motores eléctricos corresponde a la implementación de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED's). Estos equipos integran funciones de protección, control, medición, supervisión y comunicación en una sola plataforma, convirtiéndose en elementos clave de los sistemas eléctricos modernos [18].

Los IED's aplicados a motores eléctricos permiten una protección integral frente a fallas eléctricas, térmicas y operativas, además de ofrecer comunicación mediante protocolos industriales como IEC 61850, Modbus y DNP3. Esta capacidad facilita su integración con

sistemas SCADA y plataformas de automatización, mejorando la supervisión en tiempo real y la gestión eficiente de los activos eléctricos [19].

1.5 Dispositivos electrónicos inteligentes IED's

Los dispositivos electrónicos inteligentes surgieron a finales de la década de 1980 como resultado de la transición de los relés electromecánicos hacia plataformas digitales basadas en microprocesadores. Según CIGRÉ Technical Brochure 632 [20], estos equipos marcaron un cambio fundamental en los sistemas de protección al integrar funciones de medición, control, registro y diagnóstico en un solo dispositivo, superando las limitaciones de los relés analógicos tradicionales.

En la actualidad, los IED's desempeñan un rol esencial en la protección de motores, transformadores, alimentadores y bancos de capacitores, gracias a su capacidad para procesar señales en tiempo real y comunicarse mediante protocolos industriales modernos como IEC 61850 [21]. Fabricantes como Siemens [22] y Schneider Electric [23] destacan que los IED's modernos incorporan modelos térmicos avanzados, estimación de estado, autodiagnóstico y registro digital sincronizado.

CAPÍTULO 2

NORMATIVAS TÉCNICA Y METODOLOGÍA EMPLEADA

2.1 Normativas Aplicadas

La aplicación de funciones de protección en motores eléctricos se rige por diversos estándares internacionales que establecen criterios de diseño, ajuste y validación.

- **IEEE Std 3004.8-2016**

La norma proporciona una guía detallada sobre la protección de motores de bajo y medio voltaje. Define las funciones de protección esenciales como la 49, 50, 51, 46, 66, 81 entre otras y los parámetros eléctricos que deben considerarse en su configuración [4]. Un resumen de estas funciones se presenta en la Tabla 2.1, donde se muestran las protecciones implementadas en el sistema analizado

Este estándar recomienda utilizar:

- Modelos térmicos basados en I^2t
- Curvas tiempo-corriente inversas para sobrecorriente
- Coordinación selectiva con fusibles y disyuntores aguas arriba
- Criterios para protección contra fallas a tierra y desequilibrios de fase.

- **IEEE Std C37.96-2012**

El estándar ofrece directrices para la selección y aplicación de relés en motores de corriente alterna, considerando tanto las características eléctricas como las térmicas [6].

Define procedimientos para el ajuste de:

- Funciones de protección térmica
- Sobrecorriente y desequilibrio
- Falla a tierra y número de arranques
- Ajustes según el tipo de motor: jaula de ardilla, rotor devanado o sincrónico.

2.1.1 Normas complementarias

- **IEEE C37.112-2018**

Establece las ecuaciones normalizadas de las curvas de tiempo inverso (NI, VI, EI) empleadas en las funciones 51 de sobrecorriente temporizada [24].

- **IEC 60255 (2021)**

Norma internacional que define los requisitos funcionales, características de disparo y ensayos para relés de protección [8].

- **NEMA MG-1 (2021):**

Establece los límites térmicos y clasificaciones de aislamiento para motores, además de definir clases de servicio y condiciones de operación segura [5].

Los criterios establecidos por los estándares IEEE no se aplican de manera literal, sino que requieren una adaptación práctica en función de las características del motor, del sistema eléctrico y de las capacidades específicas del IED utilizado. Por esta razón, los rangos de ajuste recomendados por la normativa fueron convertidos en valores cuantitativos de arranque, alarma y disparo, los cuales sirvieron como base para la parametrización experimental del relé.

2.2 Funciones típicas de protección de motores eléctricos

Las funciones de protección aplicadas a motores eléctricos en entornos comerciales e industriales han sido estandarizadas con el fin de garantizar una operación segura, confiable y continua frente a condiciones anormales de servicio. El estándar IEEE establece un conjunto de protecciones típicas que varían según el tipo de motor, su criticidad operativa y el método de conexión, incluyendo funciones asociadas a voltaje, corriente, frecuencia, balance de fases, condiciones térmicas y estados mecánicos del rotor. Estas funciones permiten detectar oportunamente fallas eléctricas y mecánicas, minimizar daños al equipo y reducir tiempos de indisponibilidad, constituyéndose como

una referencia fundamental para el diseño y coordinación de sistemas de protección de motores en aplicaciones industriales modernas [4]. La Tabla 2.1 presenta las funciones de protección que pueden ser aplicadas a motores de inducción y motores asíncronos, considerando distintos esquemas de protección y niveles de servicio.

Tabla 2.1: Funciones típicas de protección de motores para aplicaciones comerciales e industriales (IEEE 3004-8)

Descripción	Inducción Protección mínima	Inducción Contactor E2 con fusibles	Inducción Servicio crítico con interruptor	Asíncronos Servicio crítico con interruptor
Relé de distancia	–	–	–	21 (51V)
Subvoltaje / Sobrevoltaje	27	27	27/59	27/59
Potencia direccional	–	–	32	32
Subcorriente	–	–	37	37
Temperatura de rodamientos	–	38	38	38
Protección por vibración	–	–	39	39
Pérdida de campo	–	–	–	40
Balance de corriente	–	46	46	46
Secuencia negativa	–	47	47	47
Secuencia incompleta	–	–	–	48
Sobrecarga térmica (dependiente de corriente)	49	49	49	49
Sobrecarga térmica durante el arranque	49S	49S	49S	49S
Falla de interruptor	–	–	50BF	50BF
Sobrecorriente instantánea (retardada al arranque)	–	50G	50G	50G
Sobrecorriente temporizada a tierra	–	51N	51N	51N
Rotor bloqueado	–	50LR	50LR	–
Sobrecorriente temporizada restringida por voltaje	–	51	51	51V (21)
Protección contra cortocircuito	Fusible / Interruptor	Fusible	50	50
Inhibición de corriente	–	50B	50B	–
Chequeo de excitación	–	–	–	53
Factor de potencia	–	–	–	55
Aplicación de campo	–	–	–	56
Desbalance de voltaje	–	–	60	60
Número de arranques	–	66	66	66
Sobrecorriente direccional	–	–	–	67
Supervisión del circuito de disparo	–	–	TCM	TCM
Fuera de paso	–	–	78	78
Frecuencia	–	–	81U/81O	81R/81U/81O
Bloqueo	–	86	86	86
Protección diferencial de motor	–	–	87M	87M

2.3 Equipos y Softwares implementados

2.3.1 IED'S PowerLogic™ P5 Protection Relay Motor

Es un Dispositivo Electrónico Inteligente, Figura 2.1, diseñado para la protección, supervisión y control de motores eléctricos en sistemas de medio y bajo voltaje. Este equipo integra múltiples funciones de protección normalizadas ANSI en una única

plataforma digital basada en microprocesador, permitiendo la supervisión continua de variables eléctricas críticas como corriente, voltaje, frecuencia y potencia. De acuerdo con el manual técnico del fabricante, el P5M30 incorpora protecciones contra sobrecorriente instantánea y temporizada, sobrecarga térmica mediante modelos térmicos dinámicos, desbalance de fases, rotor bloqueado, falla a tierra y condiciones anormales de voltaje y frecuencia, lo que permite una detección temprana y selectiva de fallas que podrían comprometer la integridad del motor y del sistema eléctrico asociado [25].



Figura 2.1: IED'S PowerLogic™ P5M30

Este IED destaca por sus capacidades avanzadas de medición, registro de eventos y comunicación, las cuales facilitan el análisis detallado del comportamiento del motor durante condiciones normales y de falla. Según la documentación del relé, el dispositivo permite el almacenamiento de oscilografías, registros de eventos y valores históricos, lo que contribuye significativamente al diagnóstico de fallas y a la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo. Asimismo, su compatibilidad con protocolos de comunicación industriales y herramientas de configuración como eSetup Easergy Pro posibilita su integración con sistemas SCADA y plataformas de prueba y simulación, asegurando una correcta parametrización, validación funcional y puesta en servicio de las protecciones implementadas [25].

2.3.2 Software eSetup Easergy Pro

El software *eSetup Easergy Pro* constituye la herramienta oficial de Schneider Electric para la configuración, parametrización y supervisión de los relés de protección de la familia PowerLogic™ P5, permitiendo una interacción directa entre el usuario y el IED. Mediante esta plataforma es posible definir de forma precisa los ajustes de las funciones de protección, los umbrales de disparo, los tiempos de retardo y las lógicas de operación, considerando las características nominales del motor de inducción y las condiciones específicas del sistema eléctrico. Adicionalmente, el software facilita la asignación de entradas y salidas, la implementación de esquemas de control y la visualización en tiempo real de variables eléctricas como corriente, voltaje, frecuencia y estado térmico. Según el manual técnico del relé PowerLogic™ P5, eSetup Easergy Pro permite validar los parámetros configurados antes de su puesta en servicio, reducir errores de ajuste y garantizar una correcta coordinación de protecciones, convirtiéndose en una herramienta fundamental para el análisis, simulación e implementación de sistemas de protección basados en el IED [25].

2.4 Equipo Universal de Ensayos de Relés OMICRON CMC 356

El equipo universal de prueba de relés ÓMICRON CMC 356, Figura 2.2, es un equipo de referencia mundial para la verificación de sistemas de protección. Permite realizar pruebas de inyección secundaria, en las que se simulan condiciones reales de operación mediante la inyección controlada de corriente y voltaje semejantes a las que pueden existir en estas protecciones durante la operación del sistema o de las máquinas eléctricas [26].

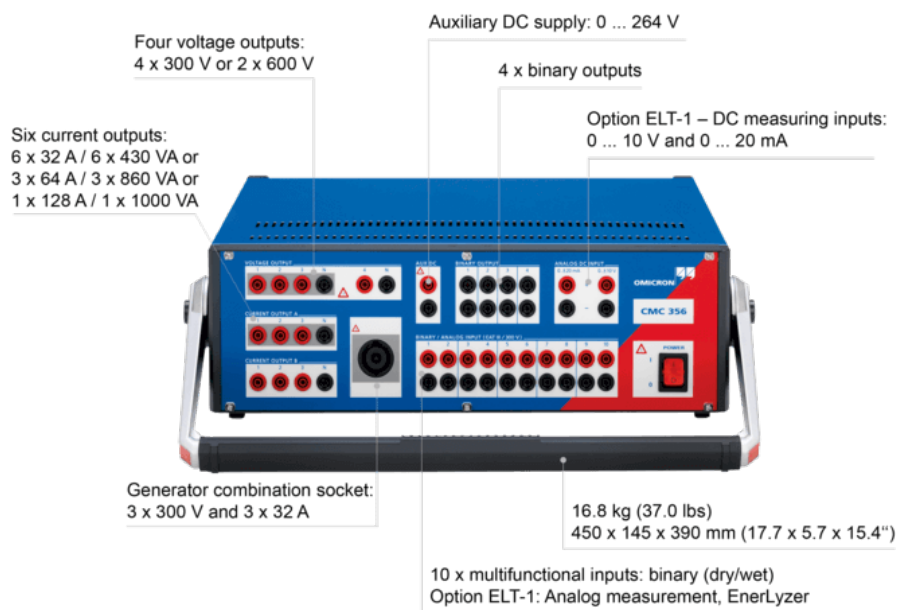


Figura 2.2: Equipo de ensayos Omnicron CMC 356

2.4.1 Software Test Universe

El programa de prueba *Test Universe* que acompaña al equipo universal de prueba de relés ÓMICRON CMC 356, posibilita la ejecución de pruebas automatizadas y el registro de los niveles de disparo *pickup* y los tiempos de disparo *trip time* de cada función [26].

Entre las pruebas más comunes se encuentran:

- **Curvas tiempo-corriente TCC:** comparación entre la curva teórica del relé y los tiempos medidos experimentalmente [24].
- **Validación de modelos térmicos - función 49:** Esta función ofrece protección contra sobrecalentamiento del motor mediante el cálculo del I^2t . En estos ensayos el equipo de prueba simula la inyección de corrientes de falla en la máquina.
- **Coordinación selectiva:** comprobación de la secuencia de disparo entre las funciones 50, 51 y 49.
- **Pruebas de desequilibrio - Función 46/47:** inyección de tensiones o corrientes asimétricas para verificar alarmas y disparos.

2.4.2 Freno Pronic Siemens 1CH5

El Freno Pronic Siemens 1CH5 de corriente continua, representada en la Figura 2.3, es un equipo de prueba de motores que permite aplicar cargas reales controladas sobre el eje del motor. A diferencia de las pruebas secundarias, este método evalúa el comportamiento térmico y dinámico del motor bajo condiciones reales de operación.



Figura 2.3: Freno Pronic Siemens 1CH5

Con base en el manual del freno Pronic Siemens 1CH5 y en los ensayos realizados, se determina que el dinamómetro permite la medición de par, velocidad, potencia activa, factor de potencia y corriente. Estas magnitudes experimentales posibilitan la comparación directa con los valores obtenidos a partir del modelo térmico implementado en el relé, facilitando la validación del comportamiento del motor bajo distintas condiciones de operación.

Su utilización es fundamental para verificar:

- La respuesta térmica del motor - Función 49 ante sobrecargas sostenidas.
- El comportamiento durante arranques múltiples - Función 66 o con torque elevado.
- La respuesta del sistema ante desequilibrios de corriente - Función 46 o pérdida de fase.

El uso del Freno Pronic Siemens 1CH5 permite realizar una validación completa del sistema de protección, evaluando tanto la respuesta eléctrica del relé como el comportamiento físico del motor. Mediante estos ensayos se asegura que las protecciones configuradas operen dentro de los tiempos y niveles definidos por los estándares IEEE 3004.8-2016, IEEE C37.96-2012 y IEC 60255, garantizando un sistema de protección integral, preciso y confiable.

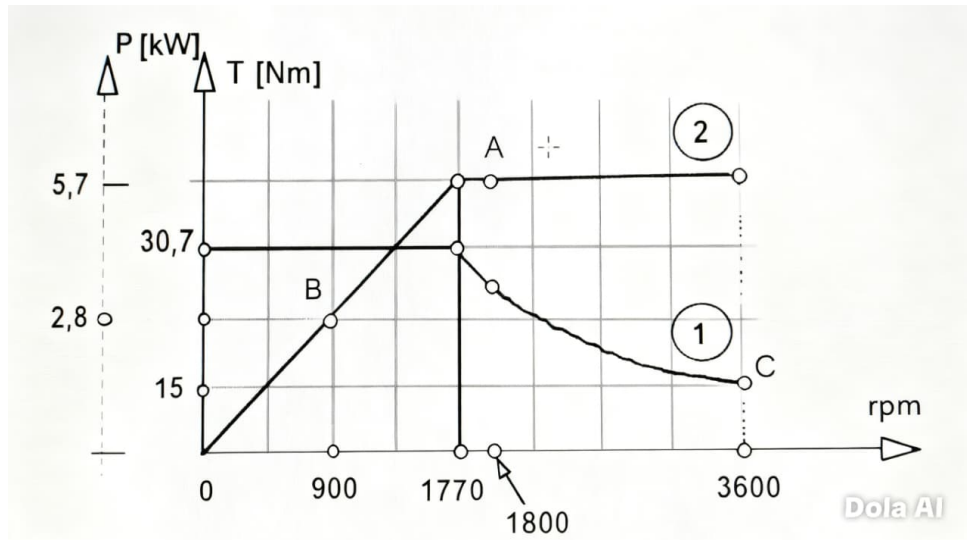


Figura 2.4: Diagrama de par y potencia en relación al número de revoluciones

La Figura 2.4 representa la relación entre el par T , la potencia P y el número de revoluciones por minuto (r.p.m.) de un motor de inducción durante las pruebas en el banco. El eje horizontal indica la velocidad mecánica del rotor, mientras que los ejes verticales muestran la potencia en kW y el par en Nm.

El comportamiento de las curvas sigue el principio electromecánico fundamental que relaciona el par y la potencia mecánica mediante:

$$P = T \cdot \omega$$

donde P es la potencia mecánica en Kilowatts (kW), T es el par en newton-metro (Nm) y ω es la velocidad angular en radianes por segundo (rad/s). Esta ecuación demuestra que la potencia depende directamente del producto entre el torque disponible y la velocidad de giro del eje.

Conversión entre unidades

Para relacionar correctamente las magnitudes de la Figura 2.4 con la ecuación, se aplican las siguientes transformaciones:

- **Conversión de revoluciones por minuto a velocidad angular:**

$$\omega = \text{r.p.m.} \times \frac{2\pi}{60}$$

Por ejemplo:

$$1800 \text{ r.p.m.} = 1800 \times \frac{2\pi}{60} = 188.5 \text{ rad/s}$$

- **Conversión de par y velocidad angular a potencia:**

$$P(\text{kW}) = \frac{T(\text{Nm}) \cdot \omega(\text{rad/s})}{1000}$$

Ejemplo aplicado al Punto A:

$$P = \frac{30.7 \times 188.5}{1000} = 5.79 \text{ kW} \approx 5.5 \text{ kW}$$

En la Figura 2.4 se identifican tres puntos de operación representativos:

- **Punto A – 1800 r.p.m.:** Corresponde a un motor de inducción de cuatro polos, con un par de 30.7 Nm y una potencia máxima aproximada de 5.5 kW. Representa la condición típica de operación de motores estándar trabajando a velocidad nominal.
- **Punto B – 900 r.p.m.:** Representa un motor de ocho polos que mantiene el mismo par de 30.7 Nm, pero desarrolla únicamente 2.8 kW debido a su menor velocidad angular. Este punto evidencia cómo motores con igual torque pueden entregar diferentes potencias en función de la velocidad.
- **Punto C – 3600 r.p.m.:** Corresponde a máquinas de alta velocidad (dos polos), donde el par de frenado se reduce a 15 Nm debido a la debilitación del campo del freno o a limitaciones del equipo de prueba, afectando la estabilidad a altas revoluciones.

Este diagrama constituye una herramienta esencial para comprender el comportamiento dinámico de los motores eléctricos, permitiendo determinar los límites de operación,

definir condiciones de prueba y seleccionar el método de acoplamiento más adecuado según la velocidad y el tipo de máquina. De este modo, se garantiza que las pruebas se realicen de manera segura, eficiente y dentro de los parámetros operativos óptimos [27].

2.4.3 Motor de inducción WEG W22

La Figura 2.5a, representa el motor de inducción de alta eficiencia energética que será utilizado en el presente estudio, diseñado conforme a las normas NEMA MG-1, IEC 60034-30-1 e IEEE 112. Forma parte de la serie W22 de la marca WEG, reconocida por su innovación tecnológica y compromiso con la eficiencia y la sostenibilidad industrial [28].

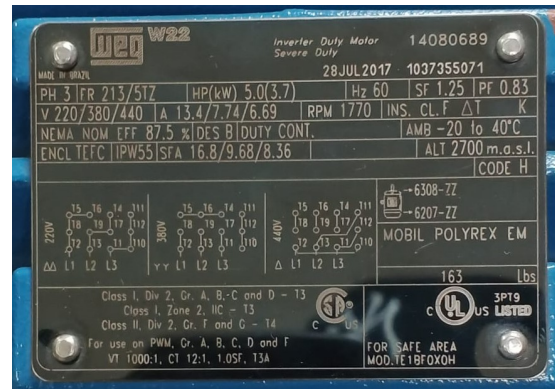
De acuerdo con los datos indicados en la placa característica del motor mostrada en la Figura 2.5b, posee una potencia nominal de 5 HP, cuatro polos y una carcasa 182/4T, diseñada en hierro fundido para ofrecer robustez mecánica y resistencia a impactos. Su sistema de ventilación IC411, correspondiente al tipo TEFC asegura un enfriamiento eficiente mediante un ventilador externo, evitando la entrada de polvo o humedad y prolongando la vida útil del aislamiento [28].

La línea W22 NEMA ha sido desarrollada para cumplir los más altos niveles de eficiencia energética, logrando un rendimiento superior al 89%, lo que permite reducción de pérdidas eléctricas, ahorro energético y menor generación de calor durante la operación [28]. Gracias a su diseño electromagnético optimizado, presenta bajas corrientes de arranque, alto par de arranque y un factor de potencia elevado, características esenciales en aplicaciones industriales de alto rendimiento.

El motor cuenta con un aislamiento clase F y aumento de temperatura clase B, lo que proporciona una reserva térmica adecuada para sobrecargas transitorias sin comprometer la integridad del aislamiento. Además, dispone de rodamientos de precisión, balance dinámico del rotor y recubrimiento anticorrosivo, elementos que aumentan la confiabilidad en ambientes industriales exigentes [28].



(a) Vista general del motor eléctrico.



(b) Placa de características del motor.

Figura 2.5: Motor de inducción utilizado en las pruebas y su placa de características.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE FUNCIONES DE PROTECCIONES

En este capítulo se describe el procedimiento experimental realizado en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana para la validación de las funciones de protección de IED aplicados a motores eléctricos de medio y bajo voltaje. Se detallan las etapas de los ensayos, los equipos utilizados y los criterios técnicos adoptados para la configuración, inyección y medición de señales durante las pruebas.

Es importante señalar que durante las pruebas realizadas con el equipo OMICRON CMC 356 se emplearon valores de voltaje y corriente correspondientes a inyección secundaria, los cuales difieren de los valores nominales del motor utilizados en las pruebas con carga mecánica real. Estas diferencias responden a las relaciones de transformación de los equipos de medida y a la naturaleza de la inyección secundaria. No obstante, dichas variaciones no afectan la validez de la comparación experimental, ya que los criterios de actuación del IED se evalúan en términos relativos (por unidad y porcentuales), conforme a los lineamientos establecidos por la normativa IEEE.

3.1 Parametrización de las funciones de protección para las pruebas experimentales mediante estándares IEEE:

La parametrización de las funciones de protección en un IED es un paso esencial para garantizar la operación segura de los motores eléctricos y la correcta actuación del sistema de protección ante condiciones anormales. En este estudio, la configuración del relé Easergy P5M30 se realizó siguiendo un procedimiento estructurado, orientado a la validación de las funciones de protección y basado en estándares internacionales.

Inicialmente, se revisaron los estándares IEEE aplicables a la protección de motores eléctricos, en particular IEEE Std 3004.8 e IEEE Std C37.96, a partir de los cuales se definieron las funciones de protección requeridas para el motor ensayado. Entre estas se incluyeron la protección térmica (49), la protección por sobrecorriente de fase (50/51), las protecciones asociadas a condiciones de desbalance y secuencia negativa (46 y 47), la protección por subvoltaje (27), así como otras funciones complementarias, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2.1.

En el caso específico de la protección térmica (49), la selección del modelo térmico y de la clase de disparo se realizó considerando el tipo de motor ensayado, su régimen de operación y las recomendaciones establecidas en la norma NEMA MG-1 [5]. Al tratarse de un motor de inducción de uso industrial general, con un número moderado de arranques y sin la presencia de cargas de alta inercia, se adoptó una clase térmica 10, la cual proporciona una protección adecuada frente a sobrecargas prolongadas sin comprometer la continuidad operativa del proceso. El margen térmico configurado permite absorber transitorios de corriente durante el arranque, evitando disparos intempestivos y asegurando una protección efectiva del aislamiento del motor. [1].

Posteriormente, se verificó la disponibilidad y configuración de las funciones de protección definidas en el Dispositivo Electrónico Inteligente Easergy P5M30, obteniéndose como resultado la Tabla 3.1, en la cual se presentan los valores de arranque, alarma y disparo de cada función, ajustados conforme a los criterios normativos establecidos y a las características del motor bajo estudio.

Tabla 3.1: Funciones de protección de motores basadas en IEEE Std 3004.8

Función	Descripción	Criterio de ajuste de alarma y disparo	Comentario
27	Subvoltaje. Detecta caídas de voltaje que afectan el par y la estabilidad del motor.	Alarma: 85–90 % de la voltaje nominal. Disparo: 70–80 % de la voltaje nominal con retardo temporizado.	Previene sobrecorrientes y recalentamiento por bajo voltaje.
37	Subcorriente. Identifica operación en vacío, pérdida de carga o falla mecánica.	Alarma: 80–90 % de la corriente nominal. Disparo: 60–70 % de la corriente nominal con retardo.	Permite detectar desacoples o fallas mecánicas.
46 (I)	Secuencia negativa de corriente. Detecta desbalance de fases.	Alarma: 5–7 % de componente de secuencia negativa. Disparo: 10–15 % con tiempo inverso.	Reduce calentamiento del rotor.
47 (V)	Secuencia negativa de voltaje. Detecta desbalance de voltaje.	Alarma: 2–3 % de secuencia negativa. Disparo: 5–8 % con retardo.	Complementa la protección 46.
49	Protección térmica del motor mediante modelo térmico.	Alarma: 90–95 % de la capacidad térmica. Disparo: 100 % de la capacidad térmica.	Protección principal contra sobrecarga prolongada.
50	Sobrecorriente instantánea ante fallas severas.	Disparo: 60–80 % de la corriente nominal.	Actúa ante cortocircuitos internos.
51	Sobrecorriente temporizada para sobrecargas.	Alarma: 110–120 % de la corriente nominal. Disparo: Curva tiempo inverso IEEE.	Facilita la coordinación de protecciones.
59	Sobrevoltaje del sistema.	Alarma: 110–115 % de la voltaje nominal. Disparo: 120–130 % con retardo.	Protege el aislamiento del motor.
66	Limitación del número de arranques del motor.	Alarma: 80–90 % del número máximo. Disparo: Exceso del límite configurado.	Evita sobrecalentamiento por arranques frecuentes.
81U	Sobre-frecuencia del sistema.	Alarma: 101–103 % de la frecuencia nominal. Disparo: 104–106 % con retardo.	Previene esfuerzos mecánicos excesivos.
81O	Sub-frecuencia del sistema.	Alarma: 97–99 % de la frecuencia nominal. Disparo: 94–96 % con retardo.	Evita pérdida de par y sobrecorriente.

Los parámetros eléctricos nominales del motor WEG W22, obtenidos a partir de la placa de características, se emplearon para el cálculo de los niveles de arranque, alarma y disparo de las funciones de protección. Dichos niveles se determinaron aplicando los criterios de ajuste establecidos en la Tabla 3.1, lo que permitió definir cuantitativamente los umbrales operativos requeridos para cada función. Los valores resultantes se presentan en la Tabla 3.2, donde las siglas empleadas corresponden a: V_n como voltaje nominal, I_n como corriente nominal, LRC como corriente de rotor bloqueado, V como voltaje, A como corriente, $^{\circ}C$ como grados centígrados, f_n como frecuencia nominal y s como segundos. Estos parámetros constituyen la base para la correcta parametrización del IED y la posterior ejecución de las pruebas de validación experimental.

Tabla 3.2: Criterios de ajuste y cálculos de funciones de protección con datos de placa del motor

Función	Criterios de ajuste – Alarma	Criterios de ajuste – Disparo	Cálculos con datos de placa
27	Pickup: $0.90 V_n$ Time delay: 3 s	Pickup: $0.80 V_n$ Time delay: 2 a 5 s	Alarma: $0.90 \times 220 = 198 V$ Disparo: $0.80 \times 220 = 176 V$
37	Pickup: $0.70 I_n$ Time delay: 5 s	Pickup: $0.50 I_n$ Time delay: 10 s	Alarma: $0.70 \times 13.4 = 9.38 A$ Disparo: $0.50 \times 13.4 = 6.70 A$
46	Pickup: $0.15 I_n$ Time delay: 5 s	Pickup: $0.20 I_n$ Time delay: 10 s	Alarma: $0.15 \times 13.4 = 2.01 A$ Disparo: $0.20 \times 13.4 = 2.68 A$
47	Pickup: $0.05 V_n$ Time delay: 3 s	Pickup: $0.10 V_n$ Time delay: 5 s	Alarma: $0.05 \times 220 = 11 V$ Disparo: $0.10 \times 220 = 22 V$
49	Pickup: $135 ^\circ C$ Time delay: 2 s	Pickup: $155 ^\circ C$ Time delay: 2 s	Modelo térmico Margen 5–10 % (Clase 10)
50	–	Pickup: $1.15 LRC$ Time delay: 0.3 s	$1.15 \times 13.24 = 15.23 A$
51	Pickup: $1.15 I_n$ Time delay: 3 s	Pickup: $20 I_n$ Time delay: 5 s	Alarma: 15.41 A Disparo: 268 A
59	Pickup: $1.10 V_n$ Time delay: 3 s	Pickup: $1.20 V_n$ Time delay: 30 s	Alarma: $1.10 \times 220 = 242V$ Disparo: $1.20 \times 220 = 264V$
66	80–90 % del límite	Bloqueo por exceso	Basado en capacidad térmica
81U	$1.01\text{--}1.03 f_n$ Time delay: 2 s	$1.04\text{--}1.06 f_n$ Time delay: 2 s	Alarma: $1.02 \times 60 = 61.2H_z$ Disparo: $1.05 \times 60 = 63H_z$
81O	$0.97\text{--}0.99 f_n$ Time delay: 2 s	$0.94\text{--}0.96 f_n$ Time delay: 0.5 s	Alarma: $0.98 \times 60 = 58.8H_z$ Disparo: $0.95 \times 60 = 57H_z$

3.2 Implementación de las funciones de protección para las pruebas experimentales en software especializado:

El acceso y la configuración del IED se realizaron mediante una conexión Ethernet directa entre el relé y el computador, utilizando el puerto Ethernet integrado del dispositivo y un cable de red estándar. Para establecer la comunicación, se asignó una dirección IP al IED dentro del mismo segmento de red del equipo de configuración, garantizando una comunicación estable, confiable y segura durante todo el proceso de parametrización. El acceso al relé se efectuó mediante el nivel de usuario *Engineer Level*, el cual proporciona los permisos necesarios para la configuración, modificación y ajuste de los parámetros internos del equipo, de acuerdo con los requerimientos del sistema de protección.

Una vez establecida la comunicación, el software *eSetup Easergy Pro* permitió el acceso a los parámetros internos del IED, facilitando la configuración, supervisión y almacenamiento de los ajustes de protección. En este contexto, los parámetros obtenidos en la Tabla 3.2 fueron implementados en la pestaña *Protección* del software (Figura 3.1a), donde se configuraron los umbrales de actuación, las temporizaciones y las curvas características correspondientes a cada función de protección, asegurando su adecuada adaptación a las condiciones operativas y características eléctricas del motor protegido.

De manera complementaria, se realizó la asignación lógica de las señales de alarma y disparo mediante la *Matriz de salida* (Figura 3.1b), lo que permitió el ruteo adecuado de los eventos de protección hacia las salidas digitales del IED. Asimismo, se configuró la *Matriz de bloqueo* (Figura 3.1c) con el propósito de inhibir selectivamente determinadas funciones de protección durante condiciones transitorias, tales como el arranque del motor, evitando actuaciones indeseadas o disparos intempestivos.

Finalmente, la configuración completa fue descargada y almacenada en el IED *Easergy P5M30*, quedando el equipo debidamente parametrizado y preparado para su validación mediante pruebas funcionales, así como para su posterior operación en condiciones reales.

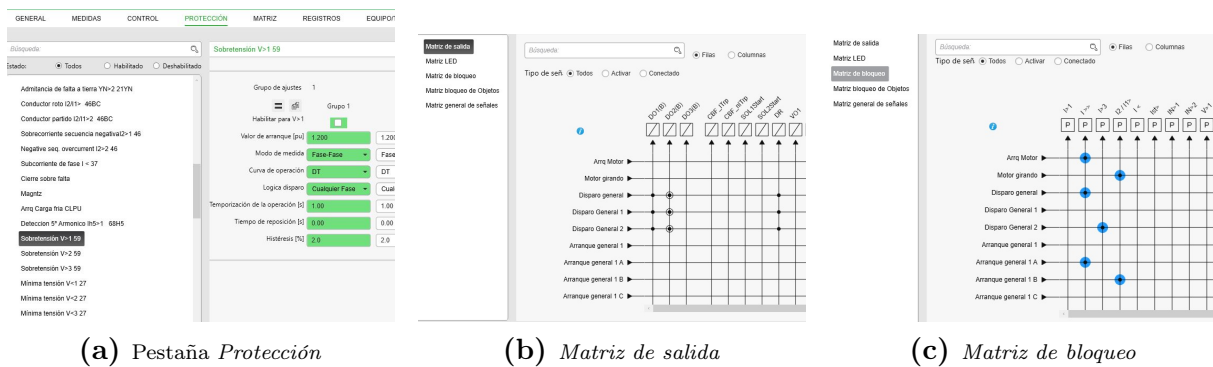


Figura 3.1: Interfaz del software *eSetup Easergy Pro*

3.3 Validación de las funciones de protección a través de pruebas experimentales

3.3.1 Casos especiales

Es importante destacar que, si bien el equipo OMICRON CMC 356 permite validar con alta precisión las funciones de protección basadas en magnitudes eléctricas instantáneas y temporizadas, existen funciones cuya lógica de actuación depende del comportamiento térmico y mecánico real del motor, tales como la función de protección térmica (49) y la función de limitación del número de arranques (66).

En estos casos, la función 49 implementada en el IED se basa en un modelo térmico dinámico que estima la temperatura del devanado del motor a partir de la corriente, el tiempo de operación y las condiciones de enfriamiento [4]. Si bien el equipo OMICRON CMC 356 permite simular niveles elevados de corriente para verificar la lógica de disparo, dicha inyección secundaria no reproduce de forma fiel el comportamiento térmico real del motor, ya que no considera fenómenos físicos como la inercia térmica, la ventilación, la disipación de calor y la interacción con la carga mecánica.

De manera similar, la función 66, correspondiente a la limitación del número de arranques del motor, se encuentra directamente asociada a la acumulación térmica generada durante cada arranque y a los tiempos de enfriamiento entre ciclos de operación [4]. Debido a que el equipo OMICRON CMC 356 realiza inyección secundaria de señales eléctricas sin reproducir el proceso físico de arranque del motor ni la generación real de calor, no es posible validar de manera completa esta función mediante pruebas de laboratorio basadas únicamente en inyección secundaria.

Por esta razón, la validación de las funciones térmicas del IED se realizó mediante pruebas experimentales con el motor de inducción WEG W22 acoplado al freno Pronic Siemens 1CH5, lo que permitió evaluar de manera directa el comportamiento del modelo térmico del relé bajo condiciones reales de operación. En este contexto, se analizaron tanto la función 49 de protección por sobrecarga térmica como la función 66 de control del número de arranques, verificando la correcta estimación de la acumulación térmica, la contabilización de los ciclos de arranque y la actuación del bloqueo cuando se superan los límites configurados.

Este enfoque experimental garantiza una validación representativa y coherente del desempeño de las protecciones térmicas, en concordancia con los criterios establecidos por las normas IEEE y NEMA.

3.3.2 Ensayos de validación

Como caso representativo, la función 59 de protección por sobrevoltaje se emplea como referencia para describir el procedimiento de validación, dado que su lógica de actuación depende directamente de magnitudes eléctricas controlables mediante inyección secundaria. A partir de este caso, las demás funciones de protección se evalúan siguiendo el mismo criterio metodológico, ajustando los niveles de voltaje, corriente y temporización según corresponda.

Los ensayos se realizaron utilizando el equipo de pruebas OMICRON CMC 356 para la generación controlada de señales eléctricas, mientras que la validación de funciones dependientes del comportamiento térmico y mecánico se efectuó mediante un motor de inducción WEG W22 acoplado al freno Pronic Siemens 1CH5, permitiendo reproducir condiciones reales de operación. Este enfoque combinado garantiza una evaluación integral y representativa del desempeño del sistema de protección.

3.3.3 Validación mediante el equipo OMICRON CMC 356

La Figura 3.2 muestra la interfaz del software *eSetup Easergy Pro* utilizada para la parametrización de la función 59 de protección por sobrevoltaje del IED Easergy P5M30. En dicha interfaz se visualizan los grupos de ajuste configurados, los valores de arranque expresados tanto en voltios como en por unidad, el modo de medición, la curva de operación seleccionada, la lógica de disparo, la temporización, el tiempo de reposición y el valor de histéresis, parámetros fundamentales para garantizar una actuación correcta de la protección.

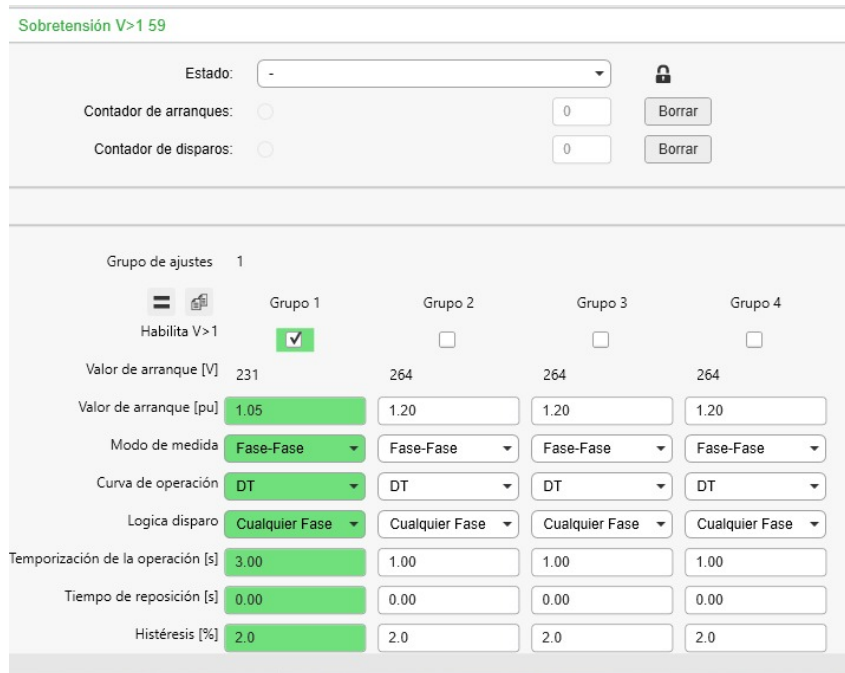


Figura 3.2: Parametrización en el software *eSetup Easergy Pro*

La Figura 3.3 presenta el esquema de conexión empleado durante las pruebas, en el cual se identifican las salidas trifásicas de voltaje y corriente del equipo OMICRON CMC 356, conectadas a las entradas correspondientes del IED. Las señales inyectadas corresponden a valores secundarios de voltaje y corriente, equivalentes a los valores primarios del sistema mediante las relaciones de transformación de los equipos de medida. Asimismo, se utilizaron las salidas digitales DO1, DO2 y DO3 del relé para la supervisión de los estados de arranque, alarma y disparo, respectivamente, permitiendo verificar de manera precisa la secuencia de actuación de la función de protección durante los ensayos.

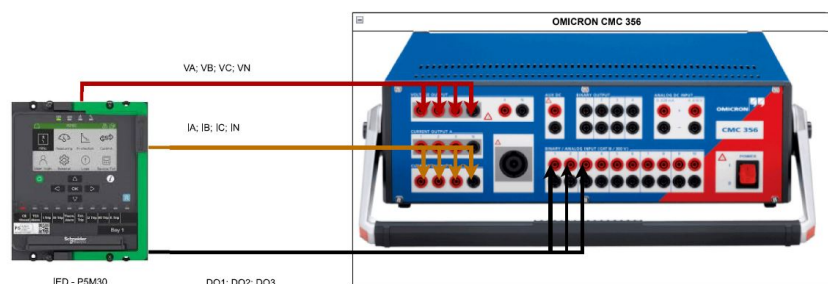


Figura 3.3: Esquema de conexión del equipo OMICRON CMC356

En la Figura 3.4 se muestra la conexión física del equipo OMICRON CMC 356 al banco de pruebas y al IED, evidenciando el cableado de las fases de voltaje, corrientes

secundarias y señales digitales. Esta configuración experimental permitió la realización de ensayos controlados, repetibles y seguros, bajo condiciones de laboratorio.

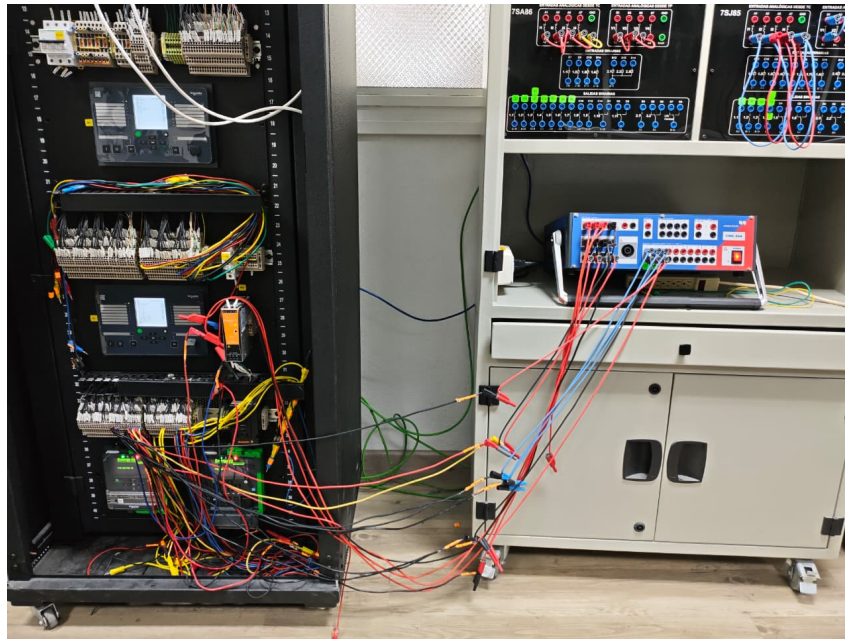


Figura 3.4: Conexión del equipo OMICRON CMC 356 en laboratorios

Finalmente, en la Figura 3.5 se presentan los valores de voltaje trifásica balanceada aplicados durante la prueba, el correspondiente diagrama fasorial y la respuesta del IED ante la condición de sobrevoltaje. Los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento de la función 59, evidenciando la detección de la condición anómala y la emisión de la orden de disparo conforme a los parámetros previamente configurados.

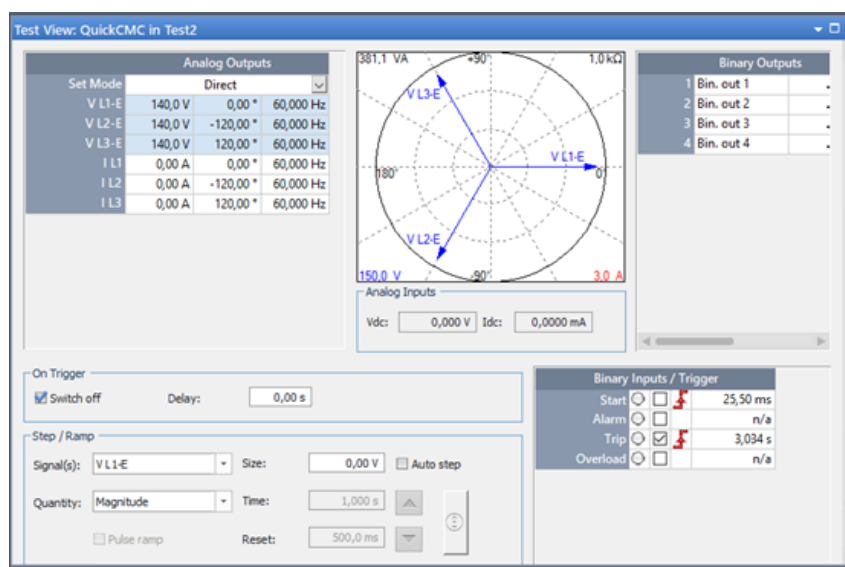


Figura 3.5: Resultados del programa Test Universal para la función 59: Sobrevoltaje

control y protección del motor. El sistema es alimentado desde un banco de generación trifásico, cuya salida se aplica a un transformador elevador con el fin de adecuar los niveles de voltaje requeridos para la realización de las pruebas experimentales.

Las señales de voltaje y corriente son obtenidas mediante transformadores de medida de potencial (TP) y de corriente (TC), respectivamente, y posteriormente cableadas hacia el IED de protección para su supervisión continua. El esquema incluye contactores y pulsadores que permiten la maniobra del circuito de potencia y la ejecución del disparo ante la detección de condiciones anormales de operación, tales como la sobrevoltaje. Finalmente, el motor de inducción WEG W22 se encuentra acoplado mecánicamente a un freno Pronic Siemens 1CH5, lo que permite la aplicación de carga controlada y la evaluación del comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación.



Figura 3.7: Montaje del sistema de protección para la validación de la función 59

En la Figura 3.8 se presenta la respuesta del IED frente a una condición de sobrevoltaje generada durante las pruebas experimentales. Las imágenes incluidas permiten analizar el comportamiento de la función de protección 59 desde la configuración inicial hasta la actuación final del relé, conforme a los parámetros establecidos.

- La Figura 3.8a muestra los parámetros configurados para la función 59, incluyendo el nivel de umbral de sobrevoltaje y el tiempo de retardo aplicado para su detección.
- La Figura 3.8b muestra el instante en el cual la función de protección 59 detecta la condición de sobrevoltaje y emite la orden de disparo correspondiente.

- La Figura 3.8c presenta el registro del evento generado por el IED, donde se detalla la secuencia de la falla, los valores eléctricos medidos y la confirmación de la correcta operación de la protección.



(a) Parámetros configurados de la función 59



(b) Actuación y orden de disparo



(c) Registro del evento de sobrevoltaje

Figura 3.8: Respuesta de la función 59 de protección por sobrevoltaje

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se obtienen resultados experimentales para todas los casos simulados en el capítulo 3. Se reproducen en general las mismas condiciones empleadas en las simulaciones en cuanto a señales de referencia utilizadas y duración de las pruebas. Previamente a la presentación de los resultados.

4.2 TIEMPOS DE RESPUESTA

Las Tablas 4.1 y 4.2 presentan la comparación entre los criterios de ajuste teóricos y los valores medidos de disparo y tiempo de respuesta (*time delay*) de las funciones de protección evaluadas. Para la obtención de estos resultados se realizaron múltiples pruebas experimentales, tanto mediante el equipo de pruebas OMICRON como con el motor WEG acoplado al freno, a partir de las cuales se determinó un valor medio representativo para cada función analizada. En ambas tablas se evalúan funciones de voltaje, corriente, desbalance y frecuencia, verificando su comportamiento frente a los valores programados. En el caso del equipo OMICRON, las pruebas de voltaje se realizaron en configuración fase-neutro debido a las limitaciones propias del equipo; no obstante, esta condición no afectó la validación de las protecciones, ya que se aplicó la correspondiente relación de transformación para representar el sistema trifásico real. Adicionalmente, en los dos montajes experimentales la medición de corrientes se efectuó mediante transformadores de corriente (TC) conectados en el secundario, con una relación de transformación de 2:1.

Tabla 4.1: Comparación entre criterios de ajuste y tiempos de respuesta obtenidos equipo OMICRON
356

Función	Criterios de ajuste	Tiempo de respuesta	Error (%)
27	Disparo: $0.80 \times 127 \times \sqrt{3} = 175.97$ V Time delay: 3 s	Disparo: 160.6 V Time delay: 3.069 s	2.30
37	Disparo: $0.50 \times 6 = 3$ A Time delay: 5 s	Disparo: 2.5 A Time delay: 5.055 s	1.10
46	Disparo: $0.20 \times 6 = 1.2$ A Time delay: 10 s	Disparo: $I_2 \geq 1.2$ A Time delay: 10.07 s	0.70
47	Disparo: $0.10 \times 127 = 12.7$ V Time delay: 3 s	Disparo: $V_2 \geq 12.7$ V Time delay: 3.032 s	1.07
50/51	Disparo: $1.15 \times 6 = 6.9$ A Time delay: 5 s	Disparo: 10 A Time delay: 3.825 s	23.50
59	Alarma: $1.10 \times 127 \times \sqrt{3} = 241.96$ V Disparo: $1.20 \times 127 \times \sqrt{3} = 264.13$ V Time delay: 3 s	Disparo: 242 V Time delay: 3.034 s	1.13
81O	Alarma: $1.02 \times 60 = 61.2$ Hz Disparo: $1.05 \times 60 = 63$ Hz Time delay: 2 s	Disparo: 63 Hz Time delay: 2.116 s	5.80
81U	Alarma: $0.98 \times 60 = 58.8$ Hz Disparo: $0.95 \times 60 = 57$ Hz Time delay: 1 s	Disparo: 55 Hz Time delay: 614 ms	38.60

Tabla 4.2: Comparación entre criterios de ajuste y tiempos de respuesta obtenidos en el motor WEG W22

Función	Criterios de ajuste	Tiempo de respuesta	Error (%)
27	Disparo: 176 V Time delay: 3 s	Disparo: 160.6 V Time delay: 3 s	0
37	Disparo: 3.35 A Time delay: 5 s	Disparo: 2.5 A Time delay: 3 s	40
46	Disparo: $I_2 > 2.68$ A (entre fases) Time delay: 10 s	Disparo: 2 A Time delay: 10 s	0
47	Disparo: $V_2 > 11$ V Disparo: 209 V Time delay: 3 s	Disparo: 202 V Time delay: 3 s	0
50/51	Disparo: 7.75 A Time delay: 5 s	Disparo: 10 A Time delay: 3 s	40
59	Disparo: 241.96 V Time delay: 3 s	Disparo: 242 V Time delay: 3 s	0
81O	Disparo: 63 Hz Time delay: 2 s	Disparo: 63 Hz Time delay: 2 s	0
81U	Disparo: 57 Hz Time delay: 1 s	Disparo: 55 Hz Time delay: 1 s	0

Los resultados experimentales obtenidos mediante el equipo de pruebas OMICRON CMC 356 y las pruebas realizadas directamente sobre el motor WEG W22 el cual se encuentra acoplado con el freno Pronic Siemens 1CH5 que actúa como una carga mecánica del sistema, permitiendo evaluar el desempeño real de las funciones de protección configuradas en el IED, en comparación con los criterios de ajuste definidos teóricamente.

En el caso de las pruebas realizadas con el equipo OMICRON, presentadas en la Tabla 4.1, las funciones asociadas a voltaje, corrientes, desbalance y sobrefrecuencia (27, 37, 46, 47, 59, 81O) muestran errores porcentuales bajos, generalmente inferiores al 6%, lo que confirma una respuesta precisa y estable del IED frente a señales controladas.

Por otro lado, las funciones de subcorriente, sobrecorriente (50/51) presentan errores porcentuales superiores, atribuibles a la alta sensibilidad del IED frente a transitorios

rápidos, a las tolerancias inherentes del sistema de medición y a la dinámica del circuito durante la inyección de corriente. De manera similar, la función de subfrecuencia (81U) presenta una actuación anticipada respecto al tiempo ajustado, causada por una caída abrupta de la frecuencia, lo que evidencia la respuesta prioritaria del IED para proteger al motor frente a condiciones de operación severas.

Los resultados obtenidos durante las pruebas sobre el motor WEG W22 acoplado al freno Pronic Siemens 1CH5, resumidos en la Tabla 4.2, muestran un comportamiento coherente con las pruebas de laboratorio. Las funciones de voltaje y frecuencia presentan errores nulos o despreciables, lo que evidencia que el sistema de protección responde adecuadamente bajo condiciones reales de operación. Sin embargo, se observan desviaciones más significativas en las funciones relacionadas con corriente y desbalance, como las funciones 37, 50/51 y 46, las cuales presentan una actuación anticipada respecto a los valores ajustados. Este comportamiento se debe a la dinámica del motor, la carga mecánica y las condiciones reales de alimentación durante la prueba, que provocan transitorios de corriente, evidenciando una respuesta inmediata del IED orientada a proteger al motor frente a condiciones anormales de operación.

El análisis de estos resultados confirma que el esquema de protección implementado cumple con los criterios de diseño establecidos y es capaz de detectar de manera efectiva condiciones anormales de operación. La combinación de simulaciones, pruebas con inyección secundaria y ensayos en un motor real permite validar experimentalmente la confiabilidad del sistema de protección, demostrando su aplicabilidad en entornos industriales reales.

La comparación entre las pruebas realizadas mediante inyección secundaria y aquellas efectuadas con carga mecánica real evidencia diferencias significativas en el comportamiento de las funciones de protección. Mientras que las pruebas con OMICRON permiten verificar la precisión y repetibilidad del IED bajo condiciones controladas, los ensayos con el motor real incorporan variables dinámicas propias del sistema, tales como inercia mecánica, variaciones de torque y transitorios térmicos. Estas condiciones justifican las desviaciones observadas y confirman que el esquema de protección implementado responde de manera conservadora, actuando de forma oportuna para preservar la integridad del motor y del sistema eléctrico asociado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La presente investigación permitió implementar y validar un esquema integral de protección para un motor de inducción de bajo voltaje mediante el uso de un Dispositivo Electrónico Inteligente PowerLogic™ P5M30, demostrando que la correcta parametrización de las funciones de protección conforme a los estándares IEEE garantiza una operación segura y confiable del sistema eléctrico y del motor protegido.

La aplicación de los criterios establecidos en las normas IEEE Std 3004.8-2016 e IEEE Std C37.96-2012 permitió definir de manera adecuada los valores de arranque, alarma y disparo de las funciones de protección, evidenciando que los rangos normativos deben ser adaptados a las características específicas del motor y a las condiciones reales de operación del sistema.

Las pruebas realizadas mediante inyección secundaria con el equipo OMICRON CMC 356 permitieron validar con alta precisión las funciones de protección basadas en magnitudes eléctricas instantáneas y temporizadas, tales como sobrevoltaje, subvoltaje, sobrecorriente, desbalance y variaciones de frecuencia, confirmando la correcta respuesta del IED frente a condiciones controladas de laboratorio.

Se evidenció que determinadas funciones de protección, particularmente la protección térmica del motor y la limitación del número de arranques, no pueden ser validadas de manera representativa mediante inyección secundaria, debido a que su lógica de actuación depende del comportamiento térmico y mecánico real del motor. Por esta razón, su

verificación mediante ensayos con carga mecánica real implementada al motor WEG W22 resultó fundamental para una evaluación integral del desempeño del sistema de protección.

La comparación entre los criterios de ajuste teóricos y los resultados experimentales mostró desviaciones en los tiempos y niveles de actuación de algunas funciones, especialmente aquellas asociadas a corriente y desbalance. Estas diferencias no representan errores de configuración, sino que responden a la dinámica propia del sistema electromecánico y reflejan una actuación conservadora del IED, orientada a priorizar la protección del motor frente a condiciones anormales de operación.

Los resultados obtenidos confirman que la combinación de pruebas con inyección secundaria y ensayos con motor real constituye una metodología complementaria y efectiva para la validación de sistemas de protección de motores eléctricos, permitiendo evaluar tanto la exactitud funcional del relé como su comportamiento bajo condiciones reales de servicio. En conjunto, el trabajo permitió estructurar un procedimiento técnico sistemático para el análisis, ajuste y evaluación de funciones de protección en IEDs aplicados a motores de inducción, integrando criterios normativos, determinación de parámetros críticos y validación experimental. La metodología desarrollada demostró que la confiabilidad, selectividad, sensibilidad y coordinación de las protecciones no dependen únicamente de la configuración predeterminada del fabricante, sino de un proceso técnico fundamentado en el estudio del comportamiento eléctrico y térmico del motor, así como en la verificación práctica de su desempeño bajo condiciones reales y simuladas.

La integración entre análisis normativo, parametrización estructurada y validación mediante inyección secundaria y carga mecánica real permitió establecer un enfoque reproducible y técnicamente sustentado, aplicable tanto en laboratorio como en entornos industriales. De esta manera, se consolida un esquema metodológico que facilita la correcta puesta en servicio y evaluación de sistemas modernos de protección de motores eléctricos.

Finalmente, el esquema de protección implementado y validado demuestra que la adecuada integración entre criterios normativos, correcta parametrización del IED y validación experimental estructurada constituye un elemento determinante para garantizar la protección efectiva de motores de inducción en entornos industriales. El procedimiento desarrollado no solo permitió verificar el desempeño del PowerLogic™ P5M30 y de sus funciones térmicas y eléctricas integradas, sino que además establece una referencia técnica para futuras implementaciones de esquemas de protección de motores

eléctricos basados en IEDs modernos.

5.2 Recomendaciones

Para futuras implementaciones de esquemas de protección de motores eléctricos, se recomienda que la validación de las funciones de protección combine ensayos mediante inyección secundaria con pruebas bajo carga mecánica real. Este enfoque resulta especialmente relevante para la evaluación de funciones dependientes del comportamiento térmico y dinámico del motor, como la protección térmica y la limitación del número de arranques, cuya actuación no puede ser representada de forma completa mediante pruebas de inyección secundaria.

Asimismo, se sugiere ampliar el análisis del desempeño del sistema de protección evaluando la respuesta del IED ante fallas transitorias y eventos dinámicos severos, tales como arranques prolongados, bloqueos mecánicos parciales y variaciones abruptas de carga, con el fin de analizar la robustez del esquema de protección frente a condiciones críticas de operación.

Como proyección de trabajos futuros, se propone la integración del IED PowerLogic™ P5M30 a un sistema de supervisión y control SCADA, lo que permitiría el monitoreo en tiempo real de variables eléctricas, estados de protección y registros de eventos. Esta integración facilitaría la trazabilidad de fallas, el análisis predictivo y la optimización de las estrategias de mantenimiento del motor.

Adicionalmente, se recomienda que investigaciones posteriores consideren la comparación entre distintos modelos de IED's para la protección de motores de diferentes fabricantes, evaluando criterios como precisión de medición, flexibilidad de parametrización, tiempos de respuesta y facilidad de integración, con el propósito de establecer buenas prácticas para la selección de equipos en aplicaciones industriales.

Finalmente, se sugiere extender la metodología desarrollada en este trabajo a motores de mayor potencia y a distintos niveles de voltaje, así como a aplicaciones que incorporen variadores de velocidad, donde los efectos térmicos, armónicos y de arranque presentan características particulares que requieren un análisis de protección más especializado. En este contexto, también resulta pertinente profundizar en el estudio de protecciones

avanzadas, el monitoreo de condición y la integración de los sistemas de protección con plataformas de digitalización industrial, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y eficiencia energética de los motores de inducción.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Std 3004.8-2016: Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems, 2016.
- [2] Jácome Barrionuevo Antony, Quizhpi Cuesta Mateo, and Quizhpi Palomeque Flavio. *Protection settings in a distribution system with a medium voltage motor as load*. IEEE, 8 2024.
- [3] IEEE Std C37.96-2012: Guide for AC Motor Protection, 2012.
- [4] Prácticas recomendadas por el ieee para la protección de motores en sistemas eléctricos industriales y comerciales. *IEEE Std 3004.8-2016*, pages 1–163, 2017.
- [5] Industrial control and systems (ics), 2021. Standard for motor protection and control.
- [6] Ieee draft guide for ac motor protection. *IEEE PC37.96/D11, August 2012*, 2012.
- [7] Rotating electrical machines, 2017.
- [8] Frequency protection and measurement relays, 2020.
- [9] A Fitzgerald and C Kingsley. *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación, 2014.
- [10] Protection and coordination of industrial and commercial power systems, 2018.
- [11] Béla Lipták. *Alternative Energy I*, pages 919–929. CRC Press, 2013.
- [12] G Pillai, Arindam Ghosh, and A Joshi. Torsional oscillation studies in an sssc compensated power system. *Electric Power Systems Research*, 55(1):57–64, 2017.
- [13] G Ziegler. Numerical differential protection: Principles and applications, 2012.
- [14] Z Gajic, S Holst, D Bonmann, and D Baars. *Stray flux and its influence on protection relays*, pages 425–435. IEEE, 2019.

- [15] A. Guzmán and J. Kasztenny. Protection of motors: Fundamentals and applications. Technical report, Schweitzer Engineering Laboratories, 2010. Technical Report.
- [16] A Abu-Siada, N Hashemnia, and S Islam. Performance evaluation of digital protection systems for electric motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4):3821–3830, 2020.
- [17] M Selvakumar and V Sathyalakshmi. Comparison of financial consumer protection of public sector banks and private sector banks: Application of mann-whitney rank sum u-test. *Asian Journal of Managerial Science*, 4(2):14–20, 2018.
- [18] Measuring relays and protection equipment - part 151, 2020.
- [19] Communication networks and systems for power utility automation, 2020. Varies depending on the specific part of the standard. See IEC website for details.
- [20] CigrÉ technical brochure 632: Modern digital protection systems. Technical report, CIGRÉ, 2015.
- [21] Nist framework and roadmap for smart grid interoperability. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2014.
- [22] Siemens AG. *SIRIUS Motor Protection and Control Systems*, 2018.
- [23] Schneider Electric. *Easergy P5 Motor Protection Manual*, 2020.
- [24] Ieee c37.112-2018 - standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays, 2018.
- [25] Schneider Electric. *PowerLogic™ P5 Protection Relay – User Manual*. Schneider Electric, 2023. Manual técnico del relé PowerLogic™ P5M30.
- [26] *OMICRON CMC 356 La unidad universal de prueba de relés y de puesta en servicio*.
- [27] *ELECTRODINAMOMETRO FRENO PRONIC*.
- [28] *Technical Catalog: W22 NEMA Premium Efficiency Motors*, 2020.

Tabla 1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:			
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética
	Códigos		Construibilidad ■
	Costos		Ergonomía
	Extensibilidad		Funcionalidad ■
	Interoperabilidad	■	Consideraciones Legales
	Mantenibilidad	■	Manufacturabilidad
	Mercadeo		Política
	Regulaciones	■	Cronogramas
	Normativas	■	Sostenibilidad
	Impacto Ambiental	■	Impacto Social
Usabilidad	■	Otros:	
Normas relevantes (dos o más)	IEEE 3004.8-2016	■	IEEE Std 1415-2006 ■
	IEEE Std C37.96-2012	■	ANSI/IEEE Std 620-1981 ■
	IEEE Std 1415-2006	■	
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades		Generación de soluciones múltiples ■
	Desarrollo de requerimientos		Evaluación de soluciones ■
	Procesos iterativos	■	Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos		
Basado en trabajos anteriores	Protecciones	■	Iluminación
	Optimización de sistemas		Alta Tensión
	Energías alternativas		Distribución
	Máquinas eléctricas	■	Otros temas

Consideraciones generales del impacto del estudio

El presente trabajo desarrolla, implementa y valida experimentalmente un procedimiento sistemático para la parametrización y verificación funcional de las protecciones eléctricas aplicadas a motores de inducción mediante el IED Easergy P5M30.

La fundamentación teórica de las funciones de protección analizadas se expone en el Capítulo 1, donde se describen los principios de operación de las protecciones eléctricas normalizadas, tales como sobrecorriente (50/51), protección térmica (49), secuencia negativa (46), pérdida o desbalance de tensión (47), subtensión (27), sobretensión (59) y limitación de arranques (66), así como los criterios establecidos en estándares IEEE y NEMA aplicables a motores eléctricos.

En el Capítulo 2 se detalla la implementación del banco de pruebas experimental, integrando el motor de inducción WEG W22, el freno Pronic Siemens 1CH5 y el equipo de inyección secundaria OMICRON CMC 356. Esta infraestructura permitió reproducir tanto condiciones eléctricas simuladas como condiciones reales de operación con carga mecánica controlada, garantizando un entorno adecuado para la validación técnica del sistema de protección.

El proceso de determinación de ajustes, parametrización en el software *eSetup Easergy Pro*, configuración de matrices de salida y bloqueo, así como la definición del modelo térmico del relé, se desarrolla en el Capítulo 3. En este capítulo se establece una metodología estructurada que parte de los datos nominales del motor, considera los criterios normativos y culmina en la implementación práctica de los parámetros dentro del IED.

Finalmente, en el Capítulo 4 se presentan los ensayos de validación funcional, diferenciando entre pruebas mediante inyección secundaria con el OMICRON CMC 356 y pruebas bajo carga mecánica real para la verificación de funciones térmicas y dinámicas como la 49 y la 66. Los resultados obtenidos demuestran la coherencia entre los criterios teóricos de ajuste y la respuesta real del sistema de protección.

Impacto en la confiabilidad y continuidad operativa

Los resultados experimentales presentados en el Capítulo 4 evidencian que una correcta parametrización, desarrollada metodológicamente en el Capítulo 3, permite asegurar una actuación selectiva, coordinada y técnicamente justificada de las funciones de protección.

La validación funcional reduce el riesgo de disparos intempestivos y, simultáneamente, garantiza la detección oportuna de condiciones anormales que podrían derivar en fallas severas del motor. En entornos industriales reales, este aspecto incide directamente en la continuidad operativa de los procesos productivos y en la reducción de tiempos de parada no programados.

Interoperabilidad, estandarización y cumplimiento normativo

El estudio demuestra la compatibilidad entre dispositivos de distintos fabricantes (IED Easergy P5M30, OMICRON CMC 356, motor WEG y freno Siemens), tal como se describe en el Capítulo 2. Esta interoperabilidad confirma que la metodología propuesta puede replicarse en diferentes entornos industriales bajo estándares internacionales.

Asimismo, la selección y configuración de funciones conforme a normas IEEE, desarrollada en el Capítulo 1, garantiza que el sistema de protección cumpla criterios técnicos reconocidos internacionalmente, fortaleciendo la trazabilidad normativa del proyecto y su alineación con buenas prácticas de ingeniería.

Aporte metodológico y fortalecimiento académico

Uno de los principales aportes del trabajo radica en la integración coherente entre teoría, configuración y validación experimental. El procedimiento estructurado presentado en el Capítulo 3, junto con la verificación práctica del Capítulo 4, constituye una guía metodológica aplicable a futuros proyectos de protección de motores eléctricos.

Este enfoque evita configuraciones empíricas o basadas únicamente en valores predeterminados del fabricante, promoviendo en cambio una parametrización fundamentada en análisis técnico, criterios normativos y validación experimental.

Impacto económico y sostenibilidad operativa

Desde el punto de vista económico, una adecuada protección del motor contribuye a prolongar la vida útil del equipo, reducir costos asociados a fallas catastróficas y minimizar intervenciones correctivas. Tal como se evidencia en los resultados del Capítulo 4, la correcta actuación de las protecciones térmicas y eléctricas evita condiciones de sobrecarga prolongada, arranques excesivos o desbalances de corriente que aceleran el deterioro del aislamiento.

En términos de sostenibilidad operativa, la reducción de fallas y la optimización del desempeño del motor inciden indirectamente en una utilización más eficiente de la energía eléctrica, contribuyendo a una gestión técnica más responsable de los recursos.

Seguridad eléctrica y protección de bienes

Las medidas de seguridad implementadas durante los ensayos experimentales, descritas en el Capítulo 2, garantizan la operación controlada del sistema de pruebas.

En aplicaciones reales, la correcta configuración del IED, desarrollada en el Capítulo 3 y validada en el Capítulo 4, reduce significativamente el riesgo de sobrecalentamientos, fallas eléctricas severas y daños mecánicos, fortaleciendo la seguridad del personal técnico y la protección de activos industriales.

Proyección hacia entornos industriales y digitalización

El procedimiento descrito a lo largo de los Capítulos 2, 3 y 4 no se limita al entorno académico, sino que puede aplicarse directamente en procesos de puesta en servicio, mantenimiento predictivo y modernización de sistemas de protección en plantas industriales.

La capacidad del IED para registrar eventos, almacenar históricos y comunicarse mediante protocolos digitales facilita su integración futura en sistemas SCADA o plataformas de monitoreo avanzado, ampliando el impacto del estudio hacia escenarios de automatización y digitalización industrial.