



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL
PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A
PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”**

Propuesta Tecnológica presentada previo a la obtención del Título
de Ingeniero Eléctrico

AUTORES:

Franklin Alfonso Acero Catucuago
César Alexander Pallo Chicaiza

TUTOR:

Ing. M.Sc. Luis Rolando Cruz Panchi

LATACUNGA-ECUADOR
FEBRERO-2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **Franklin Alfonso Acero Catucuago**, con cedula de ciudadanía N° **172772748-7** y **César Alexander Pallo Chicaiza**, con cedula de ciudadanía N° **172784515-6**, estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Electricidad declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: **“Obtención del modelo de carga polinomial para un sistema de bombeo de agua sanitaria a partir de mediciones experimentales”**, siendo el Ing. M.Sc. Luis Rolando Cruz Panchi, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo del 2024

Franklin Alfonso Acero Catucuago

C.C.: 172772748-7

César Alexander Pallo Chicaiza

C.C.: 172784515-6



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”, de los estudiantes: **Acero Catucuago Franklin Alfonso y Pallo Chicaiza César Alexander** de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo del 2024

Tutor

Ing. M.Sc. Cruz Panchi Luis Rolando

C.C: 050259517-6



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**; por cuanto, a los postulantes: **ACERO CATUCUAGO FRANKLIN ALFONSO Y PALLO CHICAIZA CÉSAR ALEXANDER** con el título de Proyecto de titulación: **“OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo del 2024

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)
Ing. MSc. Corrales Bastidas Byron Paul
CC: 050234776-8

Lector 2
Ing. MSc. León Segovia Marco Anibal
CC: 050230540-2

Lector 3
Ph.D. Marrero Ramírez Secundino
CC: 175710790-7



AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, familiares y amigos por su apoyo incondicional. Cada palabra de aliento, cada muestra de confianza y cada forma de respaldo han sido los cimientos sobre los cuales se ha construido esta tesis. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera directa o indirecta, y estoy agradecido por su presencia en este emocionante viaje de investigación.

Franklin Acero



Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por otorgarme salud y vida, permitiéndome alcanzar este importante punto en mi trayectoria. Agradezco a mi universidad por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas y adquirir conocimientos valiosos. A pesar de la ausencia física, reconozco la presencia eterna de mi padre, quien desde el cielo me envía sus bendiciones. A mi madre, le agradezco enormemente por su apoyo incondicional, tanto económico como emocional, que ha sido fundamental en cada paso de este camino. Reconozco y agradezco a todas las personas que han contribuido, de alguna manera, a mi formación y desarrollo académico. A mi tutor, le agradezco sinceramente por dedicar su tiempo y conocimientos en guiarme a lo largo del proceso de mi proyecto de tesis.

César Pallo



DEDICATORIA

Con profundo y sincero agradecimiento, dedico este trabajo a mis padres, cuyo apoyo inquebrantable ha sido mi mayor fortaleza. A mi familia, presente en cada etapa de mi vida, les expreso mi gratitud por su constante amor y cuidado. Gracias a ustedes, he podido navegar por nuevos horizontes con confianza y determinación.

A mis amigos, cómplices invaluableles de este recorrido, les dedico un reconocimiento especial. Vuestra amistad ha sido el faro en mis días oscuros y la chispa en mis momentos de celebración. Cada risa compartida y palabra de aliento ha sido un tesoro que guardo en lo más profundo de mi ser.

Este trabajo refleja el impacto profundo que han tenido en mi vida. Esta dedicatoria es un modesto tributo a la huella indeleble que han dejado en mi camino. Sin su apoyo incondicional, este logro no sería posible. Desde lo más profundo de mi ser, gracias por ser parte de esta travesía y por iluminar mi camino.

Franklin Acero



Esta tesis se la dedicó a las personas más importantes en mi vida. A mi madre, quien ha sido mi mayor fuente de amor y enseñanza. Su incansable persistencia y apoyo incondicional han sido los pilares que me han permitido alcanzar cada una de mis metas. Su influencia ha moldeado mi carácter y me llena de orgullo decir que soy su hijo. También deseo honrar la memoria de mi padre, cuyo legado perdura en cada uno de sus hijos, aunque físicamente ya no esté presente, sé que estaría lleno de orgullo al ver a sus tres hijos convertidos en profesionales. Agradezco infinitamente a mis queridos hermanos, Xavier y Evelyn, por ser mi guía y brindarme su apoyo constante a lo largo de este viaje académico. Mi gratitud se extiende hacia mi enamorada, Fátima, y a su familia que a pesar de la distancia que nos separa, nuestro amor es inquebrantable y nos mantiene unidos en el corazón. Agradezco su presencia constante, compartiendo tanto los momentos felices como los desafiantes, y sé que juntos superaremos cualquier obstáculo en nuestro camino. Además, anhelo que mi pequeña sobrina, Aythana, entienda en el futuro que este logro también es para ella y que siempre la llevaré conmigo en cada paso de mi vida.

César Pallo



ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT.....	xix
CAPÍTULO I	1
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO II.....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. EL PROBLEMA	3
2.1.1. Situación Problemática	3
2.1.2. Formulación del Problema.....	3
2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	8
2.4. BENEFICIARIOS	8
2.4.1. Beneficiarios Directos.....	8
2.4.2. Beneficiarios Indirectos	8
2.5. JUSTIFICACIÓN.....	9
2.6. OBJETIVOS.....	10
2.6.1. Objetivo General.....	10
2.6.2. Objetivos Específicos.....	10
2.7. SISTEMAS DE TAREAS.....	11



CAPÍTULO III.....	12
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1. SISTEMA DE BOMBEO	12
3.1.1. Función Principal	12
3.1.1.1. Circuito Equivalente por Fase en un Motor de Inducción	12
3.1.1.2. Modelo Matemático	14
3.1.1.2.1. Voltaje Aplicado al Estator:.....	14
3.1.1.2.2. Fuerza Electromotriz del Estator (FEM):	14
3.1.1.2.3. Corriente del Estator:	14
3.1.1.2.4. Corriente de Magnetización:	14
3.1.1.2.5. Relación de Corrientes de Rotor y Estator:.....	14
3.1.1.2.6. Pérdidas en el Núcleo:	15
3.1.1.2.7. Impedancias del Rotor:.....	15
3.1.1.2.8. Torque:	15
3.1.2. Configuración de Bombas del Sistema Existente	15
3.1.2.1. Conexión en Paralelo	15
3.2. SISTEMAS ELÉCTRICOS	16
3.2.1. Componentes del Sistema Eléctrico de Potencia	16
3.2.1.1. Generación	16
3.2.1.2. Transmisión.....	16
3.2.1.3. Distribución.....	17
3.3. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	17
3.4. ENERGÍA ELÉCTRICA	17
3.4.1. Tipos de Medidores Eléctricos.....	18
3.4.1.1. Medidores Electromecánicos	18
3.4.1.2. Medidores Electrónicos.....	18
3.4.1.3. Medidores Inteligentes	18



3.5. COMUNICACIÓN VÍA ETHERNET.....	18
3.5.1. Ventajas.....	19
3.5.2. Desventajas	19
3.6. MODELOS DE CARGA Y MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN	19
3.7. CONCEPTOS ACERCA DEL MODELADO DE CARGA	20
3.7.1. Modelo Polinomial ZIP.....	20
3.7.2. Modelos de Carga y su Clasificación.....	20
3.7.3. Modelos de Carga Estático	21
3.7.4. Modelo de Carga Exponencial.....	22
3.7.5. Modelo Polinomial.....	23
3.7.6. Modelo de Carga Lineal.....	23
3.7.7. Modelo de Carga Completo.....	24
3.7.8. Modelo de Carga Estático del Motor de Inducción	24
3.8. CONCEPTO METODOLÓGICO DE DESARROLLO DE MODELOS DE CARGA 25	
3.8.1. Desarrollo de Modelos de Carga Mediante un Enfoque Basado en Componentes.....	26
3.8.1.1. Ventajas y Desventajas del Enfoque Basado en Componentes	27
3.8.2. Desarrollo de Modelos de Carga Mediante un Enfoque Basado en Mediciones	28
3.8.2.1. Ventajas y Desventajas del Enfoque Basado en Mediciones.....	28
3.9. NORMAS Y DIRECTRICES DEL DESARROLLO DE MODELOS DE CARGA	28
3.9.1. Tipos de Señal o Datos a Medir y Pruebas de Campo Necesarias.....	30
3.9.2. Procedimientos de Recopilación de Datos.....	32
3.9.3. Procedimientos de Procesamiento y Conversión de Datos.....	34



3.9.4.	Procedimientos de Limpieza de Datos.....	35
3.9.5.	Estructura del Modelo de Carga	35
3.10.	VALIDACIÓN DEL MODELO DE CARGA.....	36
CAPÍTULO IV		37
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	37
4.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	38
4.1.1.	Descripción Inicial del Tablero Principal del Bloque A y B	38
4.1.1.1.	Descripción del sistema eléctrico del tablero principal.....	39
4.1.2.	Diseño del Sistema de Medición Inteligente	40
4.1.2.1.	Equipos y materiales utilizados.....	41
4.1.2.1.1.	Medidor EKM Omnimeter Pulse v.4	41
4.1.2.1.2.	EKM Plush3.....	42
4.1.2.1.3.	Transformador de Corriente de Núcleo Dividido Split-Core ct, 400A	43
4.1.2.1.4.	Cálculo del Burden del Transformador de Corriente 400A a 26.6mA	43
4.1.2.1.5.	Gabinete Metálico Liviano 60x40x20.....	44
4.1.2.1.6.	Fusibles y Porta Fusibles	44
4.1.2.1.7.	Borneras	45
4.1.3.	Instalación del Medidor en la Cámara de Generación de la Universidad Técnica de Cotopaxi	45
4.1.3.1.	Ubicación del sistema de medición.....	45
4.2.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	46
4.2.1.	Circuito de Fuerza.....	46
4.2.2.	Circuito de Control	48
4.2.3.	Comunicación RS-485	49
4.2.4.	Funcionamiento del Medidor.....	50
4.3.	RECOPIACIÓN DE DATOS	50
4.3.1.	Lectura del Medidor Inteligente y Verificación de Datos en la Nube EKM ..	50



4.4. METODOLOGÍA DEL MODELO DE CARGA BASADOS EN MEDICIONES	
52	
4.4.1. Paso 1	53
4.4.2. Paso 2	53
4.4.3. Paso 3	53
4.4.4. Paso 4	53
4.4.5. Paso 5	54
4.4.5.1. Errores y métricas de evolución	54
4.4.5.1.1. Coeficiente de determinación	54
4.4.5.1.2. Error medio cuadrático (RMSE)	54
4.4.5.1.3. Error absoluto medio (MAE)	54
4.4.6. Paso 6	55
4.4.7. Algoritmo para el Análisis de Datos con MATLAB	55
CAPÍTULO V	59
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
5.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON RESPECTO AL BUS PRINCIPAL	60
5.1.1. Potencia Activa vs Voltaje	61
5.1.2. Potencia Activa vs Corriente	63
5.1.3. Potencia Reactiva vs Voltaje	64
5.1.4. Potencia Reactiva vs Corriente	66
5.1.5. Errores y Métricas de Evaluación	67
5.1.5.1. Potencia Activa vs Voltaje	67
5.1.5.2. Potencia Activa vs Corriente	68
5.1.5.3. Potencia Reactiva vs Voltaje	69
5.1.5.4. Potencia Reactiva vs Corriente	70
5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO	71



5.2.1. Potencia Activa vs Voltaje.....	72
5.2.2. Potencia Activa vs Corriente	74
5.2.3. Potencia Reactiva vs Voltaje	75
5.2.4. Potencia Reactiva vs Corriente	77
5.2.5. Errores y Métricas de Evaluación.....	79
5.2.5.1. Potencia Activa vs Voltaje	79
5.2.5.2. Potencia Activa vs Corriente.....	80
5.2.5.3. Potencia Reactiva vs Voltaje.....	81
5.2.5.4. Potencia Reactiva vs Corriente	82
5.3. COSTOS DEL PROYECTO.....	82
CAPÍTULO VI	84
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
6.1. CONCLUSIONES	84
6.2. RECOMENDACIONES	85
7. BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	91



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Circuito equivalente por fase en un motor de inducción [12].	13
Figura 3.2 Curvas de operación de bombas múltiples [14].	16
Figura 3.3. Diagrama de modelos de carga.	21
Figura 3.4 Circuito equivalente de un modelo de carga estático de un motor de inducción.	25
Figura 3.5 Proceso del enfoque basado en componentes.	26
Figura 3.6 Esquema de un ejemplo de registrador de perturbaciones digitales.	30
Figura 3.7 Diagrama unifilar simplificado de conexiones de equipos para pruebas de campo	31
Figura 3.8 Clasificación del modelo de carga.	35
Figura 4.1 Descripción general de la metodología usada para el desarrollo del proyecto.	37
Figura 4.2 Diagrama unifilar del tablero principal de la UTC.	38
Figura 4.3 Gabinete principal de alimentación al cuarto de bombas y cuarto de bombeo	40
Figura 4.4 Medidor inteligente EKM [22].	42
Figura 4.5 EKM Plush3 [23].	42
Figura 4.6 TC Split-core, 400 A [24].	43
Figura 4.7 Sistema de medición inteligente.	46
Figura 4.8 Diagrama unifilar del medidor inteligente.	47
Figura 4.9 Diagrama multifilar del medidor inteligente circuito de fuerza.	48
Figura 4.10 Diagrama multifilar del sistema de medición.	49
Figura 4.11 Comunicación RS 485.	49
Figura 4.12 Funcionamiento de conectividad a internet.	50
Figura 4.13. Diagrama del prototipo.	50
Figura 4.14 Datos en el sistema EKM.	51
Figura 4.15 Datos de tensión en el sistema EKM.	51
Figura 4.16 Datos de potencia, voltaje, corriente y factor de línea en el sistema EKM.	52
Figura 4.17. Procedimientos típicos del enfoque basado en mediciones IEEE Std 2781.	52
Figura 4.18 Algoritmo de procesamiento de datos y obtención del modelo en MATLAB.	56
Figura 5.1 Comportamiento del sistema de bombeo, parámetros eléctricos con respecto a la línea 1.	60
Figura 5.2 Comportamiento de la corriente en la línea 1 del sistema de bombeo.	61
Figura 5.3 Curva de potencia activa vs promedio de voltajes ajuste polinómico.	62



Figura 5.4 Curva de potencia activa vs promedio de corriente ajuste polinómico.....	63
Figura 5.5 Curva de potencia reactiva vs voltaje promedio ajuste polinómico.....	65
Figura 5.6 Curva de potencia reactiva vs promedio de corriente ajuste polinómico.....	66
Figura 5.7 Diagrama unifilar correspondiente al sistema de bombeo de agua potable de la localidad.....	72
Figura 5.8 Curva de potencia activa vs promedio de voltajes, ajuste polinómico.	73
Figura 5.9 Curva de potencia activa vs promedio de corrientes, ajuste polinómico.	74
Figura 5.10 Curva de potencia reactiva vs voltaje promedio, ajuste polinómico.....	76
Figura 5.11 Curva de potencia reactiva vs promedio de corriente, ajuste polinómico.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Sistemas de tareas.....	11
Tabla 3.1 Requisito mínimo de configuración de entrada.....	32
Tabla 3.2 Requisito mínimo de configuración de conjunto de datos.	33
Tabla 3.3 Requisito mínimo de configuración de hardware.....	33
Tabla 3.4 Tasa de muestreo versus desarrollo del modelo de carga.....	34
Tabla 4.1 Código de colores de acuerdo a la NEC [24].	47
Tabla 5.1 Coeficientes de regresión polinomial para potencia activa vs voltaje.....	61
Tabla 5.2 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia activa vs corriente.	63
Tabla 5.3 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs voltaje promedio.	64
Tabla 5.4 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de corriente.....	66
Tabla 5.5 Errores y métricas de evaluación de potencia activa vs voltajes.....	67
Tabla 5.6 Errores y métricas de evolución de potencia activa vs corrientes.	68
Tabla 5.7. Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs voltaje.....	69
Tabla 5.8 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs corriente.	70
Tabla 5.9 Coeficientes de regresión polinomial para potencia activa vs voltaje.....	72
Tabla 5.10 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia activa vs corriente.	74
Tabla 5.11 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de voltajes.....	76
Tabla 5.12 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de corriente.....	77
Tabla 5.13 Errores y métricas de evaluación de potencia activa vs voltajes.....	79
Tabla 5.14 Errores y métricas de evolución de potencia activa. vs corrientes.	80
Tabla 5.15 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs voltaje.....	81
Tabla 5.16 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs corriente.	82
Tabla 5.17. Costos del sistema de medición.....	83



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”

Autores:

Acero Catucuago Franklin Alfonso

Pallo Chicaiza César Alexander

RESUMEN

La identificación de variaciones en las características de las cargas, junto con el comportamiento de la energía eléctrica, son factores esenciales para el modelado de carga, planificación y operación de un sistema eléctrico. El propósito central del estudio es la creación de un modelo matemático polinomial, que describa el comportamiento de un sistema integrado de motores de inducción. Por lo tanto, se optó un enfoque que incluye la implementación de un sistema de medición, la realización de pruebas y la recolección y procesamiento de datos conforme a estándares establecidos por la norma IEEE Std 2781, con el fin validar un modelo de carga. A partir de los datos obtenidos, se reveló la eficacia del modelo polinomial de segundo grado para describir la interacción entre las potencias activa y reactiva y sus correspondientes voltajes y corrientes en un entorno trifásico, a pesar de los obstáculos presentados por el funcionamiento irregular de las bombas, cargas adicionales y el impacto de los bancos de condensadores. Al final, con los datos procesados, se obtiene el modelo polinomial que se valida posteriormente para asegurar su precisión y utilidad. Los primeros resultados revelaron un coeficiente de determinación R^2 inferior al 70%, lo que indicó la necesidad de realizar mejoras. Esto se debió a problemas ocasionados por los bancos de condensadores y el funcionamiento no constante de las bombas. Sin embargo, al utilizar datos más consistentes y estables, se desarrolló un modelo más fiable, con un nivel de confianza superior al 70%. Este estudio demostró que el modelo es capaz de describir de manera efectiva cómo varían las cargas bajo diferentes condiciones, y confirmó su utilidad para planificar y operar sistemas de bombeo de manera efectiva.

Palabras clave: Modelado de carga, motores de inducción, ajuste polinómico, MATLAB, mediciones eléctricas.



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME: “GETTING THE POLYNOMIAL LOAD MODEL FOR A SANITARY WATER PUMPING SYSTEM FROM EXPERIMENTAL MEASUREMENTS”

Authors:

Acero Catucuago Franklin Alfonso

Pallo Chicaiza César Alexander

ABSTRACT

The identification of variations in load characteristics, together with the behavior of electrical energy, are essential factors for the modeling, planning and load operation of an electrical system. The central purpose of the study is the creation of a polynomial mathematical model that describes the behavior of an integrated system of induction motors. Therefore, an approach that includes the implementation of a measurement system, the performance of tests and the collection and processing of data according to standards established by IEEE Std 2781 was chosen, in order to validate a load model. From the data obtained, the effectiveness of the second-degree polynomial model was revealed to describe the interaction between active and reactive powers and their corresponding voltages and currents in a three-phase environment, despite the obstacles presented by the irregular operation of the pumps, additional loads and the impact of capacitor banks. In the end, with the processed data, the polynomial model is obtained, which is subsequently validated to ensure its precision and usefulness. Early results revealed a coefficient of determination R^2 of less than 70%, indicating the need for improvements. This was due to problems caused by the capacitor banks and the non-constant operation of the pumps. However, by using more consistent and stable data, a more reliable model was developed, with a confidence level greater than 70%. This study demonstrated that the model is able to effectively describe how loads vary under different conditions, and confirmed its usefulness for planning and operating pumping systems effectively.

Keywords: Load modelling, induction motors, polynomial fitting, MATLAB, electrical measurement.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Cando Guanoluisa Fabiola Soledad, cédula de identidad número 0502884604, Magister en Lingüística aplicada a la enseñanza bilingüe español-Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1027-2016-1656136; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del proyecto de investigación con el título: **“OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”** de: **Acero Catucuago Franklin Alfonso, y Pallo Chicaiza César Alexander**, egresados de la carrera de **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, 28 de febrero del 2024



.....
Msc. Cando Guanoluisa Fabiola Soledad
CI: 0502884604

CAPÍTULO I

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: “OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA SANITARIA A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES”

Tipo de Proyecto: Propuesta Tecnológica.

Carrera: Ingeniería en Electricidad.

Proyecto de investigación vinculado: Implementación de Tecnologías de Eficiencia Energética en el Sector Productivo del Sector de San Felipe para Reducir las Pérdidas Eléctricas.

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación: Ing. MSc. Cruz Panchi Luis Rolando

Estudiantes: Acero Catucuago Franklin Alfonso, Pallo Chicaiza Cesar Alexander

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Conversión y uso racional de la energía eléctrica

CAPÍTULO II

2. INTRODUCCIÓN

El modelado de carga desempeña un papel crucial en la simulación y modelado de sistemas eléctricos, ya que implica considerar una variedad de factores complejos. La representación inadecuada de las cargas en el sistema a menudo conduce a discrepancias entre las respuestas simuladas y registradas del sistema, generando errores y resultados optimistas en el análisis de estabilidad. Estos errores pueden desviar el funcionamiento de los sistemas de control y protección de emergencia, llegando incluso a ocasionar cortes de energía a gran escala, la atención hacia el modelado de cargas ha aumentado tanto en la industria como en el ámbito académico, especialmente con la aparición de nuevos tipos de cargas, sin embargo, muchos de los modelos de carga en uso fueron desarrollados hace décadas y no han sido actualizados en consecuencia.

Con el objetivo de obtener modelos precisos de carga y establecer un documento unificado, se ha creado esta guía que proporciona políticas y procedimientos integrales para el modelado y simulación de carga. En primer lugar, el documento ofrece una descripción general de los modelos de carga, incluyendo tanto los modelos existentes como algunos modelos emergentes y requisitos estándar, en segundo lugar, se presentan metodologías para el desarrollo de modelos de carga, con una comparación detallada entre enfoques basados en componentes y basados en mediciones, en las cuales se destacan normas y pautas para el desarrollo de estos modelos, también se proporciona una visión crítica y actualizada de las oportunidades y desafíos del modelado de carga, considerando el proceso del enfoque basado en mediciones para la validación del modelo de carga polinomial.

En consecuencia, se proponen pautas para las simulaciones de sistemas eléctricos que incluyen diversos modelos de carga, esto abarca aspectos como portadores de simulación, modelos y entornos de simulación, así como el tratamiento y análisis de datos, además, se presenta un estudio de caso de prueba basado en un enfoque basado en mediciones para demostrar el potencial comparado con la realidad del sistema, el cual incorpora estadística y programas computacionales para el tratamiento de datos y validación del modelo polinomial, este enfoque se plantea como beneficioso para futuros trabajos en el ámbito del modelado de carga.

2.1. EL PROBLEMA

2.1.1. Situación Problemática

La proliferación de nuevas tecnologías impacta directamente en la configuración de las cargas eléctricas, actualmente, se emplean modelos de años anteriores que no se adaptan de manera adecuada a las características específicas de las diversas cargas. En el ámbito de los sistemas eléctricos, uno de los desafíos significativos para la optimización radica en los modelos de carga. Estos modelos, al no ser lo suficientemente precisos, pueden resultar en una baja confiabilidad del sistema, dado que gran parte de las cargas conectadas exhiben variaciones espaciales y temporales, los datos evaluados no reflejan de manera precisa el funcionamiento real de dichas cargas, esto, a su vez, compromete la fiabilidad del sistema.

Varios estudios han incorporado metodologías para verificar el impacto de estabilidad de pequeñas perturbaciones, han dedicado esfuerzos a la mejora de los modelos existentes dentro del modelamiento de cargas, pero el comportamiento de la carga respecto al tiempo y la falta de adquisición de datos presentan problemáticas para el desarrollo de un modelo polinomial apropiado, asimismo la falta de información precisa de la composición de la carga en motores de inducción de baja potencia, las características del comportamiento de las componentes de la carga, particularmente para bajos voltajes, potencia activa y reactiva.

La carencia de un modelo de carga polinomial ajustados a la realidad a partir de mediciones experimentales adaptado a la operación del sistema de bombeo, provoca incertidumbre en relación con el sistema eléctrico que suministra energía al motor de inducción y su correcto funcionamiento.

2.1.2. Formulación del Problema

La ausencia de un modelo de carga polinomial ajustado a la realidad decrece la confiabilidad del sistema eléctrico, dificultando la optimización eficiente de la operación y el diseño.

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL

En el año 2013, Nelson Morales y Rodrigo Rubio [1] , analizaron los Modelos De Carga Y Sus Efectos En Estudios Sistémicos: Aplicaciones Al Sing, donde el objetivo principal de este trabajo es analizar y determinar el impacto que tiene la modelación de cargas en estudios

sistémicos realizados en el Sistema Interconectado Norte Grande, SING, sin embargo para lograr el objetivo se revisa la literatura y se implementan casos de estudio donde se visualiza el impacto que tiene la modelación de cargas en las en tensión y frecuencia para los distintos modelos de cargas y se verifica la influencia que los modelos de carga tienen en el diseño y operación del sistema. Además, se identifican y comparan las influencias que tienen la dependencia de la frecuencia, dependencia de tensión y la constante de inercia asociada a la carga motriz. Finalmente, los resultados del estudio realizado indican que los modelos de cargas eléctricas son relevantes para identificar la respuesta de las variables eléctricas del sistema ante diversas contingencias. Sin embargo, se destaca que la elección del modelo de carga debe tomar en cuenta el objetivo del estudio. En este sentido, en ocasiones se aceptan discrepancias menores, las que otorgan mayor seguridad en la toma de decisiones de operación, debido a la incertidumbre en las variables de simulación involucrada.

Por otra parte, Jaime Caiza [2], presenta la obtención de modelos de carga para artefactos eléctricos modernos, los cuales son calculados por medio de mediciones realizadas en el laboratorio bajo condiciones controladas de voltaje en estado estable. En el marco de este proyecto, se lograron avances significativos, incluyendo la determinación de modelos de carga apropiados para electrodomésticos modernos, la comprensión del comportamiento de las cargas actuales en relación al voltaje y la corriente, la obtención de curvas de potencia con tendencia hacia líneas rectas, la identificación de cargas de potencia constante en dispositivos clave de la sociedad moderna como computadoras, laptops y monitores, y el desarrollo exitoso del modelo ZIP que mejor se ajustó a los datos experimentales, lo que contribuye al entendimiento y gestión eficiente del consumo de energía en aplicaciones cotidianas y futuras investigaciones relacionadas con electrodomésticos y sistemas eléctricos.

Además, IEEE STANDARDS Y ASSOCIATION [3], realizó una guía para modelado de carga y Simulaciones para sistemas de potencia, el cual presenta el modelado de carga juega un papel importante en el modelado de sistemas de energía, y el modelo de carga es un componente indispensable en la simulación de sistemas de energía. Finalmente, la guía ha logrado un amplio alcance al definir modelos de carga para una variedad de dispositivos eléctricos en diferentes niveles de tensión, abarcando elementos convencionales y emergentes en la industria de la energía. Se enfoca en el desarrollo de modelos de carga, la identificación de parámetros y el uso de datos de medición. Además, considera dispositivos modernos, como vehículos eléctricos

y tecnología IOT, para un modelado más detallado y eficiente de las cargas sin necesidad de encuestar a los clientes. Este enfoque es esencial dada la rápida evolución de la industria energética con la creciente adopción de energías renovables y la tecnología IOT. La guía promueve prácticas estandarizadas para mejorar la aceptación y la interoperabilidad en este campo.

En el año 2015, Sandra Pérez, Luis Rodríguez, Juan Mora [4], publicaron el artículo sobre la obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación. En este artículo, se presenta una revisión de las principales metodologías empleadas en la obtención de modelos de carga compuestos en sistemas eléctricos de potencia. Como estrategia para presentar esta investigación, se inicia describiendo y clasificando las metodologías utilizadas para obtener los modelos de carga compuestos, sus diversas modificaciones y la incorporación de nuevas herramientas en los últimos años, según la información recopilada en más de 60 referencias encontradas en las principales bases de datos. Las ventajas del modelo de carga compuesto se verifican al final del artículo, donde se compara su comportamiento con el modelo de carga estática y se realiza un análisis de su capacidad de generalización frente a diversas perturbaciones en el sistema de potencia. Finalmente, se demuestra que la capacidad de generalización del modelo compuesto depende de la magnitud de la perturbación utilizada en su estimación, lo que destaca la necesidad de monitoreo continuo en el sistema para capturar respuestas transitorias significativas, estos resultados contribuyen a mejorar la representación de fenómenos dinámicos en sistemas de potencia y la adaptación de modelos de carga compuestos.

Considerando el análisis del Estado del Arte y Tendencias en el Modelamiento de Carga llevado a cabo por Constante Joffre y Colomé Graciela [5], es crucial subrayar la importancia del modelamiento de carga en diversas áreas, como el diseño, la planificación, la operación y el control de sistemas eléctricos, así como en otros estudios y aplicaciones relacionados con su funcionamiento eficiente. A pesar de que el modelamiento de carga ha sido objeto de amplias investigaciones en el pasado, en la actualidad ha experimentado un renovado interés tanto por parte de los investigadores como de la industria. Esto se atribuye a diversos factores, como el cambio tecnológico en la demanda, el crecimiento constante de las redes, la operación cercana a los límites de estabilidad, la presencia de generación distribuida y la extensa implementación de tecnologías de medición, entre otros aspectos relevantes. En última instancia, el artículo

destaca una tendencia hacia la automatización y la aplicación de técnicas en tiempo real en la identificación paramétrica. Además, se observa un creciente uso de técnicas de aprendizaje automático y Big Data en el modelado de carga, aunque se reconoce la necesidad de realizar más investigaciones en esta área, asimismo, se hace hincapié en el potencial de las redes neuronales artificiales para llevar a cabo la identificación paramétrica.

En la ciudad de México, en el año 2010, Jesús Carmona llevó a cabo una sección de estudios de posgrado e investigación para el departamento de ingeniería eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, según lo reportado por [6]. Este estudio abordó específicamente los Modelos de Motores de Inducción para Estudios Estáticos de Sistemas de Potencia. La investigación resalta que una parte significativa de la carga en los sistemas eléctricos de potencia está compuesta por motores de inducción, y el impacto de este tipo de cargas en la mayoría de los sistemas es considerable, ya que tienden a restaurar su consumo después de un disturbio, además, se evidencia que en sistemas que operan en proximidad a sus límites de estabilidad, es imperativo modelar detalladamente este tipo de carga para reproducir de manera precisa el comportamiento dinámico del sistema de potencia durante apagones. En consecuencia, se destaca la necesidad de mejorar la representación de la carga de motores de inducción en todos los estudios de sistemas de potencia, incluyendo aquellos que emplean modelos estáticos de componentes del sistema de potencia, como los estudios de flujos de potencia y estabilidad de voltaje a largo plazo. En estos estudios, es común representar la carga en el nivel de la red de transmisión mediante una característica estática de potencia constante, la cual se considera inapropiada para captar el comportamiento del motor de inducción frente a variaciones lentas de su voltaje terminal.

En el año 2018, Sabela Gonzáles realizó un Estudio e Implementación de Modelos de Carga en Sistemas Eléctricos de Distribución, según se menciona en [7]. Este estudio se centra en el desarrollo de modelos de cargas estáticas que posibiliten el funcionamiento del sistema consumiendo potencia, impedancia o intensidad constante en diferentes escenarios y análisis. La investigación concluyó con la simulación de un sistema de distribución y sus desequilibrios correspondientes, utilizando la herramienta Simulink de Matlab, que demostró ser versátil para este tipo de estudios, además, se llevó a cabo un análisis del flujo de cargas para un sistema de cuatro nodos, permitiendo a Simulink la selección entre consumir potencia, impedancia o intensidad constante. Posteriormente, se implementaron modelos fasoriales para el mismo

sistema, involucrando la ejecución de múltiples flujos de carga a lo largo del tiempo. Se desarrollaron modelos de carga específicos para simular este comportamiento, y se verificó la coincidencia de resultados entre el análisis de flujo de cargas y el análisis fasorial. Asimismo, se crearon modelos de carga en Simulink adaptados para estudiar el régimen transitorio, analizando resultados para valores de potencia constante y perfiles de carga en cada uno de los tres modelos. Estos esfuerzos de simulación y análisis han proporcionado una visión más integral del comportamiento del sistema de distribución en diversas condiciones.

Adicionalmente, en 2013, Rodríguez Luis, Pérez Sandra y Mora Juan, como se describe en [8], llevaron a cabo un estudio de estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial utilizando técnicas metaheurísticas. Este estudio presenta la aplicación de una metodología para obtener los parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial mediante mediciones del sistema de potencia. La estimación de los parámetros se plantea como un problema de optimización, el cual se resuelve mediante la técnica de enjambre de partículas. La validez de esta propuesta se evaluó en un sistema de potencia de prueba, donde se representó el comportamiento de una carga compuesta ante variaciones en la tensión del barraje. La implementación de la metodología demostró que el modelo propuesto reprodujo adecuadamente los datos utilizados para la estimación. Además, se validó la respuesta de la estimación al aplicar una perturbación diferente, mostrando un acercamiento aproximado en la representación ante condiciones no conocidas previamente. Estos resultados respaldan la idea de desarrollar modelos de carga a partir de mediciones, los cuales pueden mejorarse mediante el uso de estructuras más complejas o técnicas de mayor rigurosidad matemática.

En 2020, Samuel Cardona, según se describe en [9], desarrolló un Método Adaptativo de Selección del Modelo de Carga basado en Enjambre de Partículas (PSO). Este enfoque, centrado en la obtención de modelos de carga a través del enfoque basado en mediciones, ha surgido como un campo de estudio altamente interesante. A lo largo de los años, se han presentado diversas propuestas tanto en técnicas de estimación de parámetros como en técnicas de adaptación de modelos, todas destinadas a mejorar la capacidad de generalización de los modelos frente a registros diferentes a los utilizados en la estimación. La investigación de Loaiza Cardona propone una metodología de adaptación del modelo de carga compuesto en dos etapas. En la primera etapa, fuera de línea, se lleva a cabo una caracterización previa de los

registros de perturbaciones medidos en el barraje de carga, seleccionando factores de ponderación. Estos factores se emplean en la segunda etapa, en línea, para obtener modelos de carga frente a nuevas perturbaciones, agilizando el proceso de obtención del modelo en comparación con la obtención clásica basada en mediciones. La validación de la metodología se realizó mediante la comparación del modelo de carga compuesto modificado desarrollado en la investigación con el modelo existente en la literatura, adaptándolo a diferentes comportamientos de la señal de voltaje ante perturbaciones en el sistema eléctrico.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Desarrollar un modelo matemático sobre el comportamiento dinámico del sistema de bombeo ante cambios de los parámetros del sistema, basado en mediciones experimentales.

El campo de acción para el proyecto: 330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.99 Transmisión y Distribución.

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Beneficiarios Directos

Comunidad investigadora de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4.2. Beneficiarios Indirectos

Profesionales y personal académico que identifique la posibilidad de realizar un estudio más amplio con respecto al modelado de cargas utilizando diferentes técnicas estadísticas.

2.5. JUSTIFICACIÓN

La ejecución de este proyecto tiene como propósito medir parámetros eléctricos necesarios para la obtención de un modelo de carga polinomial a partir de un enfoque basado sistema de medición inteligente, para lograrlo, se instalará un medidor que facilitará la recopilación de datos, permitiendo la verificación de variables cruciales como tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva. La evaluación de datos se llevará a cabo conforme al modelo polinomial en un periodo de tiempo determinado, considerando las pequeñas variaciones existentes en el sistema de bombeo. Este enfoque tiene como objetivo evidenciar el funcionamiento del sistema de bombeo y presenta una propuesta innovadora en relación con el modelado de carga polinomial, en contraste se busca introducir nuevas técnicas estadísticas para representar el modelo de cargas lo más parecido con la realidad, todo esto se llevará a cabo mediante la medición y asimilación de datos, marcando así el comienzo de la adopción de bases para futuros proyectos de generación en la institución.

Asimismo, este proyecto contribuirá significativamente la adquisición del conocimiento previamente adquirido por los autores mediante la investigación bibliográfica, este enriquecimiento se logrará al contrastar y analizar los datos recopilados por el medidor utilizando técnicas básicas para el análisis de datos y la representación de los mismos. La ejecución de esta investigación proporcionará una comprensión detallada del comportamiento del sistema de bombeo en estudio, dado que la propuesta se traduce en una implementación tangible, se espera que sirva como estímulo para que los autores perfeccionen sus habilidades en los ámbitos técnico e ingenieril. La confrontación entre la teoría investigada y la aplicación práctica fomentará un aprendizaje práctico y consolidará las capacidades técnicas de los autores en el contexto específico de este proyecto.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. Objetivo General

- Obtener un modelo matemático de carga polinomial para representar el comportamiento de un sistema de bombeo de agua sanitaria mediante mediciones experimentales.

2.6.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca de la literatura existente sobre el modelamiento de cargas en sistemas eléctricos de potencia con el fin de obtener información que permita dar paso a la elección de un modelo pertinente.
- Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real mediante la verificación del sistema eléctrico que alimenta la sala de bombas para el registro y análisis de parámetros eléctricos durante condiciones.
- Desarrollar el modelo experimental considerando el enfoque detallado basado en mediciones según la norma IEEE Std 2781 para la obtención de coeficientes.
- Análisis estadístico de datos correspondiente a la lectura del medidor inteligente para la obtención de coeficientes.

2.7. SISTEMAS DE TAREAS

Tabla 2.1 Sistemas de tareas.

Objetivos Específicos	Actividades (Tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar acerca de la literatura existente sobre el modelamiento de cargas en sistemas eléctricos de potencia con el fin de obtener información que permita dar paso a la elección de un modelo pertinente.	Revisión de artículos científicos, informes, normas o tesis sobre el modelamiento de cargas (estáticas, dinámicas, exponenciales, polinomiales ZIP, lineales y completas).	Identificación de dificultades al aplicar métodos de modelamiento de cargas eléctricas.	Bases de datos académicas especializadas, análisis de casos de estudio, revisión de papers científicos, normas eléctricas, tesis y libros.
	Selección de la metodología para el desarrollo de modelos de carga.		
Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real mediante la verificación del sistema eléctrico que alimenta la sala de bombas para el registro y análisis de parámetros eléctricos durante condiciones.	Diseño del plano eléctrico y del sistema de comunicación.	Monitoreo y análisis de datos eléctricos en tiempo real bajo condiciones de operación.	Sistemas de adquisición de datos, herramientas de instalación, plataformas de software especializado.
	Selección del equipo y dimensionamiento de componentes		
	Configuración y pruebas de conexiones.		
Desarrollar el modelo experimental considerando el enfoque detallado basado en mediciones según la norma IEEE Std 2781 para la obtención de coeficientes.	Desarrollo de un algoritmo en MATLAB para clasificar las variables.	Adecuación del modelo matemático a los estándares y requisitos establecidos en la norma IEEE Std 2781TM-2022, validando los datos a través de técnicas de regresión lineal empleando los programas EXCEL y MATLAB.	Software EXCEL y MATLAB para el modelado, datos experimentales, documentación de la norma IEEE.
	Obtención de curvas.		
	Obtención de índices del modelo.		
Análisis estadístico de datos correspondiente a la lectura del medidor inteligente para la obtención de coeficientes.	Comparación estadística de datos obtenidos.	Resultados de simulaciones demuestren cuan fiable son los datos de coeficientes.	Software MATLAB para el modelado, datos experimentales.
	Análisis de los resultados obtenidos.		

CAPÍTULO III

3. MARCO TEÓRICO

3.1. SISTEMA DE BOMBEO

Es el aquel sistema que cuenta con diversas partes que hacen posible el recorrido mediante tuberías, así como también el acopio eventual de líquidos, permitiendo que las especificaciones de caudal y presión sean cumplidas en los procesos. El equilibrio hidráulico se da gracias al balance de energía donde se contabiliza o se tiene en cuenta a la energía potencial, cinética y pérdidas en energía, además, el conjunto de bombeo está compuesto por los componentes necesarios para el traslado de líquidos, englobando el equipo de bombeo, la infraestructura tubular y los contenedores pertinentes, por lo tanto, este sistema abarca elementos como una cisterna, una bomba y un tinaco [10].

3.1.1. Función Principal

Un equipo de bombeo está formado principalmente por dos partes, la bomba y su accionador (puede ser motor eléctrico o de combustión interna, etc.), el procedimiento de acción es el siguiente: El accionador se encarga de derivar la energía mecánica y, cuando esto sucede, la bomba la transforma en energía cinética, el fluido lo obtiene en forma de presión, velocidad y posición [11].

3.1.1.1. Circuito Equivalente por Fase en un Motor de Inducción

Dado que el motor de inducción constituye el elemento esencial en un sistema de bombeo, es crucial entender su modelo equivalente para garantizar un funcionamiento óptimo de dicho sistema. Este modelo equivalente se asemeja estrechamente al de un transformador, reflejando el proceso de transformación de energía que subyace en la inducción de corrientes dentro del rotor a partir del estator, en este proceso, el estator actúa como el primario de un transformador, generando un campo magnético que, a su vez, induce un voltaje en el rotor, que actúa como el secundario.

Esta inducción electromagnética, que permite la transferencia de energía sin contacto físico entre el estator y el rotor, es también la base de funcionamiento de los transformadores, por lo tanto el circuito equivalente es una herramienta valiosa para analizar la conversión de energía

eléctrica en energía magnética y viceversa, así como para calcular las pérdidas energéticas en las distintas partes del motor, por lo cual, comprender estos aspectos es fundamental para la eficiencia y rendimiento de los sistemas de bombeo que dependen de estos motores para su operación [12].

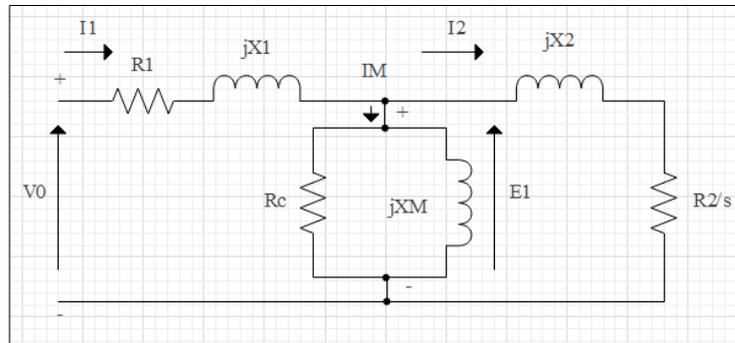


Figura 3.1 Circuito equivalente por fase en un motor de inducción [12].

Donde:

- V_0 : Es el voltaje de entrada aplicado al estator.
- I_1 : Es la corriente de entrada que fluye a través del estator.
- R_1 : Es la resistencia del estator, que representa las pérdidas por efecto Joule en el bobinado del estator.
- jX_1 : Es la reactancia de dispersión del estator, que representa la parte del flujo magnético que no se acopla con el rotor.
- I_μ : Es la corriente de magnetización, que fluye debido a la reactancia de magnetización jX_M y representa la corriente necesaria para establecer el flujo magnético en el núcleo del motor.
- R_c : Representa las pérdidas en el núcleo del motor, a menudo asociadas con las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el hierro del estator.
- E_1 : Es la fuerza electromotriz inducida en el estator por el campo magnético rotativo.
- jX_M : Es la reactancia de magnetización del motor, relacionada con el flujo magnético principal que vincula el estator y el rotor.
- I_2 : Es la corriente del rotor, que circula por las impedancias del rotor.

- **jX_2** : Es la reactancia de dispersión del rotor, que representa el flujo magnético en el rotor que no se acopla de vuelta con el estator.
- **R_2/s** : Es la resistencia del rotor dividida por el deslizamiento s , que representa las pérdidas por efecto Joule en el rotor y es variable dependiendo de la velocidad del rotor.

3.1.1.2. Modelo Matemático

3.1.1.2.1. Voltaje Aplicado al Estator:

La ecuación del voltaje aplicado al estator (V_0) considera la caída de voltaje a través de la resistencia y la reactancia del estator, véase Ecuación 3.1:

$$V_0 = I_1 * R_1 + j * I_1 * X_1 + E_1 \quad (3.1)$$

3.1.1.2.2. Fuerza Electromotriz del Estator (FEM):

La FEM del estator (E_1) (Ecuación 3.2) es el voltaje inducido en el estator y está en fase con el flujo magnético principal producido por la corriente de magnetización:

$$E_1 = I_\mu * jX_M \quad (3.2)$$

3.1.1.2.3. Corriente del Estator:

La corriente del estator (I_1) es la suma de la corriente de magnetización (I_μ) y la corriente del rotor referida al estator (I_2), véase, Ecuación 3.3

$$I_1 = I_\mu + I_2 \quad (3.3)$$

3.1.1.2.4. Corriente de Magnetización:

La corriente de magnetización (I_μ) (Ecuación 3.4) es la corriente que fluye a través de la reactancia de magnetización y la resistencia del núcleo:

$$I_\mu = V_0 / (R_C + jX_M) \quad (3.4)$$

3.1.1.2.5. Relación de Corrientes de Rotor y Estator:

La corriente del rotor (I_2) está relacionada con la FEM del estator (E_1) y las impedancias del rotor, véase Ecuación 3.5:

$$I_2 = E_1 / (R_2/s + jX_2) \quad (3.5)$$

3.1.1.2.6. Pérdidas en el Núcleo:

Las pérdidas en el núcleo, representadas por R_C , se pueden modelar como una resistencia a través de la cual fluye la corriente de magnetización, generando calor debido a las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault.

R_C representa las pérdidas en el núcleo.

3.1.1.2.7. Impedancias del Rotor:

Las impedancias del rotor incluyen la resistencia del rotor (R_2) y la reactancia del rotor (X_2). Ambas son referidas al estator.

R_2 y X_2 son las impedancias del rotor referidas al estator.

3.1.1.2.8. Torque:

Aunque no se muestra directamente en el circuito, el torque (T) por el motor de inducción se puede relacionar con la potencia transferida al rotor y el deslizamiento, véase Ecuación 3.6 [13]:

$$T = P_{rotor} / (2\pi * N_r) = 3 * E_1 * I_2 * \cos(\varphi_2) / (2\pi * N_r) \quad (3.6)$$

3.1.2. Configuración de Bombas del Sistema Existente

3.1.2.1. Conexión en Paralelo

El sistema de bombeo de agua sanitaria, consta de 6 motores de inducción trifásicos de 25 HP, 60 Hz, 3510 rpm y funciona a un voltaje de 220 V, por ende, la utilización del bombeo en paralelo se justifica por la situación donde se requiere aumentar el caudal, manteniendo un ligero incremento en la presión, como ilustra la Figura 3.2, la implementación de múltiples bombas en paralelo extiende el rango de flujo suministrable al sistema.

Es crucial tener presente que, al operar bajo esta disposición, es crucial que las bombas empleadas simultáneamente presenten características de rendimiento idénticas. Esto se debe a que bombas con curvas de rendimiento diferentes, al ser acopladas en paralelo, no pueden

operar eficientemente en su punto óptimo de eficiencia, por lo tanto, este desajuste aumenta significativamente la probabilidad de fallos en el sistema [14].

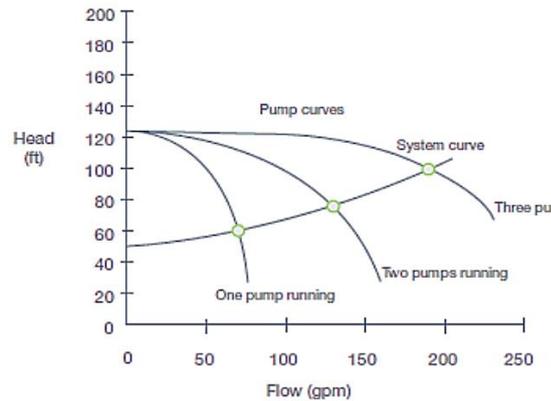


Figura 3.2 Curvas de operación de bombas múltiples [14].

3.2. SISTEMAS ELÉCTRICOS

Un sistema de energía eléctrica se define como el conjunto integrado por dispositivos, maquinaria, infraestructura y materiales dedicados a la generación, el transporte y la distribución de electricidad, en su etapa inicial, este sistema convierte la energía disponible en la naturaleza, a través de medios como la energía hídrica, eólica, la quema de combustibles fósiles, la nuclear, solar y la geotérmica, en electricidad utilizable.

Dentro de estos sistemas, el tratamiento de la energía se realiza mayoritariamente en la modalidad de corriente alterna, por lo tanto, en este contexto, tanto los circuitos de corriente como los de voltaje alterno son estimulados por fuentes que generan ondas sinusoidales.

3.2.1. Componentes del Sistema Eléctrico de Potencia

3.2.1.1. Generación

Este segmento se encarga de convertir diversas formas de energía en electricidad dentro de estaciones generadoras como centrales térmicas o hidroeléctricas.

3.2.1.2. Transmisión

La función de las redes de transmisión es desplazar la energía eléctrica en volumen significativo desde las plantas de generación hasta áreas de alta demanda.

3.2.1.3. Distribución

A través de las redes de distribución se dirige la electricidad desde los nodos de interconexión de la red de transmisión directamente a los usuarios finales [15].

3.3. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Se implementan dispositivos de medición de energía para cuantificar el uso de electricidad en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, esto facilita el cálculo del importe energético consumido, en consonancia con las normativas y tarifas establecidas por la compañía que suministra la energía, por este motivo, existen contadores electromecánicos y digitales en la medición energética, los cuales son esenciales para el registro del consumo eléctrico a lo largo de un período determinado con el objetivo de efectuar la facturación.

3.4. ENERGÍA ELÉCTRICA

La electricidad, ampliamente utilizada en nuestra vida diaria, es una manifestación de energía que surge de la diferencia de potencial entre dos puntos, lo que posibilita el flujo de cargas eléctricas a través de un conductor, resultando en efectos térmicos, magnéticos y de iluminación.

Por lo cual, diferentes métodos son empleados para generar electricidad, cada uno con su propio proceso de transformación, transmisión y distribución, estos varían desde el uso de combustibles fósiles hasta fuentes renovables como la solar o la eólica, y las diferencias son significativas en comparación con la energía generada por grandes plantas hidroeléctricas.

En lo que respecta a la medición de la electricidad, se adopta el Joule como la unidad estándar de energía y el segundo como la unidad de tiempo fundamental, la potencia, la energía y el tiempo están vinculados por una relación específica Ecuación 3.7, es decir:

$$Potencia(P) = \frac{energía (E)}{tiempo (t)} \quad (3.7)$$

Una vez despejada la energía se considera la siguiente Ecuación 3.8:

$$E = P \times t \quad (3.8)$$

“La energía es la cantidad de potencia por unidad de tiempo” [16].

- Símbolo: kWh
- Unidad: Kilovatio-hora (kWh)
- Instrumento de medida: Medidor o contador

3.4.1. Tipos de Medidores Eléctricos

3.4.1.1. Medidores Electromecánicos

Estos representan los dispositivos convencionales que emplean un disco giratorio impulsado por la corriente eléctrica para cuantificar el consumo de energía, en donde la velocidad de rotación del disco guarda relación con la cantidad de energía consumida.

3.4.1.2. Medidores Electrónicos

Se trata de dispositivos más contemporáneos que emplean tecnología electrónica para medir y mostrar el consumo de energía, por lo que, estos medidores pueden ofrecer mayor precisión y, con frecuencia, incluyen características adicionales, como la capacidad de establecer comunicación con sistemas de gestión de energía.

3.4.1.3. Medidores Inteligentes

Constituyen una versión avanzada de los medidores electrónicos, incorporando funcionalidades adicionales, como la capacidad de transmitir datos de consumo en tiempo real tanto a las empresas de servicios públicos como a los usuarios, además posibilitan la implementación de tarifas flexibles y simplifican la gestión eficiente de la energía [17].

3.5. COMUNICACIÓN VÍA ETHERNET

La comunicación vía Ethernet empleada comúnmente en la interconexión de equipos informáticos, esencial en la implementación para la adquisición de datos en un sitio web. Las redes Ethernet se estructuran comúnmente en dos tipos de topologías básicas conocidas como "bus" y "estrella". Estas estructuras son fundamentales para entender la interconexión de los diferentes elementos en una red, que pueden ser tanto dispositivos finales como computadoras e impresoras, o dispositivos de red como concentradores, interruptores y router. En la topología de "bus", los dispositivos se enlazan uno tras otro a lo largo de un único canal de comunicación, por lo tanto, cada dispositivo tiene la capacidad de comunicarse con otros en la misma línea de

conexión, sin embargo, un fallo en el cable principal puede interrumpir la comunicación en toda la red hasta que se solucione el problema.

3.5.1. Ventajas

- **Estandarización global:** Su aceptación internacional asegura la interconectividad con una variedad de equipos.
- **Prevalencia en la industria:** Su incorporación extensiva en redes Ethernet junto a su compatibilidad con distintos tipos de cableado lo establece como una solución práctica.
- **Alto desempeño:** Asegura transmisiones de datos rápidas y fiables, promoviendo una comunicación eficiente.
- **Conexión fiable:** Presenta un diseño con un sistema de bloqueo que previene desconexiones no deseadas.

3.5.2. Desventajas

- **Requiere conocimiento técnico:** Su instalación puede ser compleja, necesitando de habilidades y herramientas especializadas.
- **Vulnerabilidad a contaminantes:** Como interfaz expuesta, es susceptible a la acumulación de residuos que pueden mermar su funcionalidad.
- **Restricciones de longitud:** La longitud de los cables está limitada, lo cual puede resultar en una señal degradada al exceder ciertas distancias.
- **Desafíos de compatibilidad:** Aunque es comúnmente utilizado, puede enfrentar limitaciones al integrarse con tecnologías emergentes o cables no estándar [18].

3.6. MODELOS DE CARGA Y MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN

A continuación, se presentan de manera general los métodos para la implementación de modelos de carga, respaldados por una breve retrospectiva basada en mediciones, que tiene en cuenta tanto sus ventajas como desventajas. Además, se ofrece un resumen de los diversos tipos de modelos de carga diseñados para abordar el modelo de carga estático.

3.7. CONCEPTOS ACERCA DEL MODELADO DE CARGA

La carga se define como un dispositivo que emplea energía eléctrica para su funcionamiento por consiguiente consume potencia activa, este está conectado en paralelo a un sistema de alimentación dedicado al uso de consumo de electricidad.

Por otro lado, si se considera una composición fraccionada de carga por medio de diferentes componentes, se emplea el término composición de carga. Además, se toman en cuenta las características propias de la carga, como la potencia activa, reactiva, voltaje, corriente, entre otras. Estas características pueden predecirse a partir de un modelo matemático mediante el uso de un circuito equivalente.

3.7.1. Modelo Polinomial ZIP

Se presenta como uno de los modelos más frecuentes al momento de modelar carga estática, representando a la carga como un compendio de carga con impedancia, corriente y potencia constante.

3.7.2. Modelos de Carga y su Clasificación

Un modelo de carga se muestra como la representación matemática entre voltaje, potencia y corriente que consume el dispositivo. Los modelos de carga se clasifican en: modelos de carga estáticos y modelos de carga dinámicos, véase Figura 3.3:

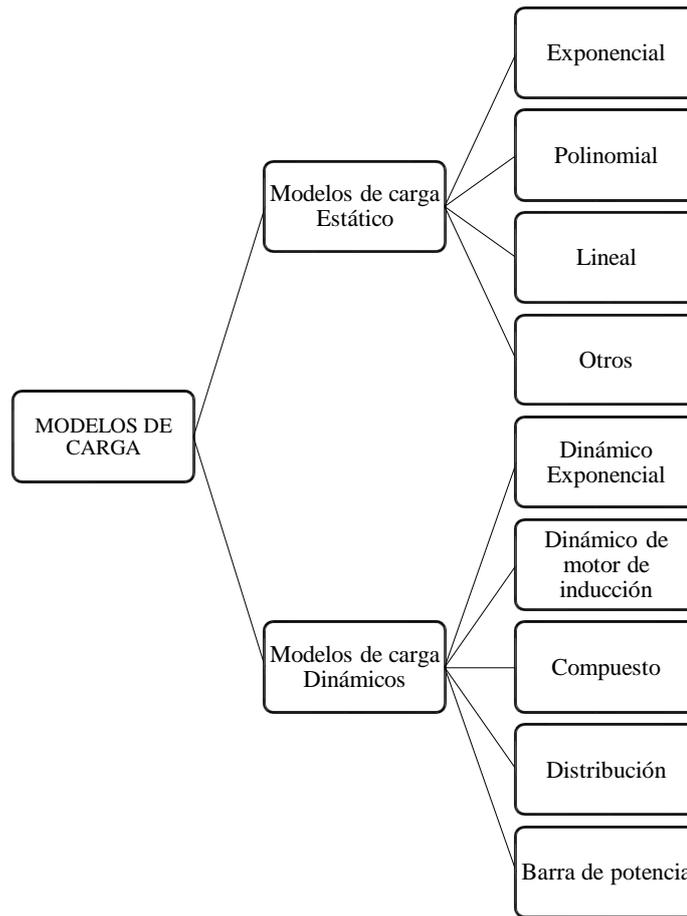


Figura 3.3. Diagrama de modelos de carga.

Los modelos de carga juegan un papel vital en el diseño, planificación y operación de sistemas eléctricos. Los modelos de carga estática son ampliamente preferidos porque son menos complejos en comparación con los modelos dinámicos basados en ecuaciones diferenciales porque utilizan ecuaciones algebraicas [19]. Los modelos estáticos ofrecen una flexibilidad considerable y pueden representar diferentes tipos de cargas. Los modelos dinámicos, por otro lado, están diseñados para casos más específicos donde se prioriza la correspondencia física sobre la flexibilidad.

3.7.3. Modelos de Carga Estático

Este modelo es adecuado para representar cargas que tienen una respuesta casi instantánea a cualquier cambio en la tensión y frecuencia de la red eléctrica. Los modelos de carga estática también se pueden utilizar para describir cargas que responden tan rápidamente a los cambios de voltaje que la dinámica del proceso excede las capacidades de medición del dispositivo, o

cuando se centra en la respuesta de la carga que ignora el transitorio inicial. En este último caso, se puede decir que el nuevo equilibrio se alcanza "instantáneamente", es decir, en muy poco tiempo [20].

La estructura general de un modelo de carga estática incluye componentes Ecuación 3.9 de potencia activa y Ecuación 3.10 reactiva que dependen del voltaje y la frecuencia.

$$P = f_P(V, f) \quad (3.9)$$

$$Q = f_Q(V, f) \quad (3.10)$$

Estos modelos se utilizan principalmente para representar equipos de carga resistiva, sistema de iluminación, y cargas análogas que no cuentan con la incorporación de motores de inducción de gran potencia. Este modelo se usa mayormente en los cálculos de flujo de potencia y estudios de estabilidad de voltaje.

3.7.4. Modelo de Carga Exponencial

Un modelo de carga exponencial es un enfoque matemático que describe el crecimiento o la disminución de una carga o demanda a lo largo del tiempo mediante una función exponencial. En el contexto de sistemas eléctricos o de red, este tipo de modelo se utiliza comúnmente para representar cómo la demanda de energía puede cambiar con el tiempo.

La función exponencial se caracteriza por un crecimiento o decrecimiento proporcional a la magnitud actual de la cantidad que está cambiando. En el caso de un modelo de carga exponencial, la carga aumenta o disminuye en una proporción constante respecto a su valor actual [20].

En Ecuación 3.11 y Ecuación 3.12 P y Q representa la potencia activa y reactiva en función de la tensión V y la frecuencia la potencia activa y reactiva f , P_n y Q_n en función de la tensión y frecuencia nominal V_n y f_n .

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{pu}} \left(\frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}} \quad (3.11)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{qu}} \left(\frac{f}{f_n} \right)^{k_{qf}} \quad (3.12)$$

Este modelo se lo denomina como ZIP debido a su impedancia Z, corriente I, y potencia P constantes, dando una potencia activa y reactiva constantes. Dado que las variaciones de voltaje son más comunes que las de frecuencia las ecuaciones se simplificarían mostrándose así la Ecuación 3.13 y Ecuación 3.14.

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{pu}} \quad (3.13)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{k_{pu}} \quad (3.14)$$

3.7.5. Modelo Polinomial

Este modelo es considerado comúnmente, en un polinomio de segundo grado mostrando así la Ecuación 3.15 y Ecuación 3.16.

$$P = P_n = \left[P_1 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + P_2 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + P_3 \right] \quad (3.15)$$

$$Q = Q_n = \left[Q_1 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + Q_2 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + Q_3 \right] \quad (3.16)$$

3.7.6. Modelo de Carga Lineal

Un modelo de carga lineal es un enfoque matemático que describe la demanda de energía o carga eléctrica como una función lineal del tiempo. Se utiliza cuando el rango referente a la variación de la tensión es muy corto esto puede evidenciarse en el análisis de estabilidad del sistema, en un modelo de carga lineal, se asume que la tasa de cambio de la carga es constante con respecto al tiempo, generando una relación lineal entre la carga y la variable temporal. Denotado en la Ecuación 3.17 y Ecuación 3.18.

$$P = P_0 \left[a_0 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) \right], \quad \sum_{i=1}^2 a_i = 1 \quad (3.17)$$

$$Q = Q_0 \left[b_0 + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) \right], \quad \sum_{i=1}^2 b_i = 1 \quad (3.18)$$

3.7.7. Modelo de Carga Completo

Este modelo de carga está diseñado principalmente para funcionamiento con voltaje muy bajo.

De acuerdo a la nomenclatura indica que el modelo es capaz de capturar características de carga tanto estáticas como dinámicas. La característica de esto voltajes es que pueden crear cargas estáticas cuando el voltaje cae, especialmente en la electrónica de potencia. Los dispositivos tienen distintos umbrales por debajo de los cuales dejan de funcionar y consumen energía. El modelo de carga estática compuesto consta de un modelo polinómico y dos exponenciales contando con la Ecuación 3.19.

$$P = P_n [P_{ZIP} + P_{EX_1} + P_{EX_2}] \quad (3.19)$$

Dada la Ecuación 3.20, Ecuación 3.21 y Ecuación 3.22:

$$P_{ZIP} = \left[P_1 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + P_2 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + P_3 \right] \quad (3.20)$$

$$P_{EX_1} = \left[P_4 \left(\frac{V}{V_n} \right)^{a_1} (1 + k_{pf1} \Delta_f) \right] \quad (3.21)$$

$$P_{EX_2} = \left[P_5 \left(\frac{V}{V_n} \right)^{a_2} (1 + k_{pf2} \Delta_f) \right] \quad (3.22)$$

3.7.8. Modelo de Carga Estático del Motor de Inducción

Este tipo de modelo de carga se emplea predominantemente en naciones desarrolladas, ya que, en dichos lugares, la contribución de la carga proveniente de los motores de inducción constituye entre el 60% y el 70% del total de la demanda eléctrica [20].

La conceptualización de este modelo se desprende del circuito equivalente del motor de inducción de la siguiente manera:

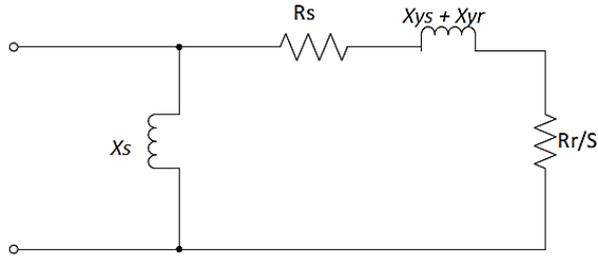


Figura 3.4 Circuito equivalente de un modelo de carga estático de un motor de inducción.

Donde:

- X_s : Reactancia *Shunt*.
- R_s : Resistencia del estator.
- $X_{ys} + X_{yr}$: Reactancia de fuga del estator y reactancia de fuga del rotor.
- $R_{r/s}$: Resistencia del rotor sobre susceptancia.

La Ecuación 3.23 y Ecuación 3.24 son usadas comúnmente para el modelo de carga estático donde:

$$P = \left(R_s + \frac{R_s}{S} \right) \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_s}{S} \right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} \quad (3.23)$$

$$P = (X_{ys} + X_{yr}) \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_s}{S} \right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} + \frac{U^2}{X_s} \quad (3.24)$$

3.8. CONCEPTO METODOLÓGICO DE DESARROLLO DE MODELOS DE CARGA

Las estrategias para desarrollar modelos de carga se dividen principalmente en dos categorías: el enfoque centrado en componentes, también conocido como "enfoque basado en el conocimiento", y el enfoque centrado en mediciones, también conocido como "enfoque basado en el comportamiento". Por lo general, el primer enfoque se emplea con mayor eficacia en modelos de carga que involucran múltiples componentes, como el modelo ZIP. En cambio, el último enfoque es más apropiado para modelos de carga que incorporan varios componentes, así como un único componente.

3.8.1. Desarrollo de Modelos de Carga Mediante un Enfoque Basado en Componentes

El enfoque basado en componentes representa una estructura de modelo de carga agregada común en la que las categorías de carga, las composiciones de carga y las proporciones de carga se considerarían completamente, como se muestra en la Figura 3.5. El modelo agregado generalmente incorpora el modelo de una carga individual y está representado por un modelo polinómico de segundo orden y un modelo motor.

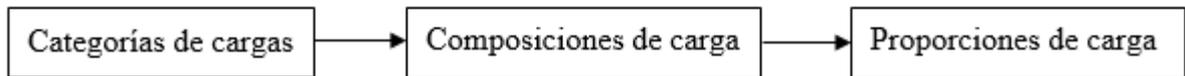


Figura 3.5 Proceso del enfoque basado en componentes.

Específicamente, el enfoque basado en componentes sigue tres pasos, en primer lugar, las cargas conectadas a nivel de subestación están claramente categorizadas, desde la perspectiva del consumo de carga, se agregan cuatro tipos de carga en un bus de distribución: carga residencial, carga comercial, carga industrial y carga de infraestructura pública, por lo tanto, diferentes tipos de categorías de carga pueden requerir diferentes tipos de estándares de suministro de energía, por lo tanto tiene diferentes requisitos en su modelado de carga.

En segundo lugar, se consideran claramente la estructura y composición de cada categoría de carga, por ejemplo, para la carga residencial, es necesario abordar varios tipos de electrodomésticos como el aire acondicionado, la lavadora, la secadora, el lavavajillas, el refrigerador, la bomba de refrigeración o calefacción, la iluminación y algunos otros aparatos electrónicos del hogar, por lo tanto, los diferentes usuarios finales pueden tener diferentes aparatos en uso.

En tercer lugar, se estiman claramente las características típicas y la proporción de cada categoría de carga, una prueba de ello es que para la carga residencial, los diferentes electrodomésticos tienen diferentes características de energía y también pueden tener diferentes rendimientos según los diferentes hábitos de comportamiento eléctrico de los clientes, el mayor desafío es identificar las contribuciones porcentuales de cada componente de carga dentro de la categoría de carga considerada, sin embargo, obtener esta información depende de un gran número de encuestas a los clientes, lo que requiere mucho tiempo y es económicamente costoso.

3.8.1.1. Ventajas y Desventajas del Enfoque Basado en Componentes

Las ventajas del enfoque basado en componentes se concentran principalmente en el beneficio de las categorías de carga y el análisis de la composición de la carga:

- Es efectivo para construir el modelo de carga a nivel de subestación, considerando las categorías de carga, además, puede aplicarse fácilmente a diferentes tipos de modelos de carga compuestos.
- Es flexible para el desarrollo futuro de modelos y la gestión potencial del control de la demanda, ya que tiene en cuenta las composiciones y condiciones específicas del sistema.
- Al basarse directamente en componentes de carga individuales, promueve el desarrollo de la sensibilidad del rendimiento del sistema a los cambios en las composiciones de carga.

Las desventajas del enfoque basado en componentes también se concentran en los puntos débiles de las categorías y composiciones de carga:

- Primero, dado que las subestaciones son diferentes, la estructura y composición de una subestación tiene muchas diferencias con respecto a otra; el modelo de carga conocido, por lo tanto, no se puede aplicar directamente a otra subestación.
- En segundo lugar, aunque el modelo de carga para un determinado componente de carga es constante, los parámetros operativos pueden variar según su entorno específico; por ejemplo, el mejor ajuste de temperatura para un refrigerador es diferente entre las condiciones de invierno y verano, por lo tanto, las características, estructura y composición de un modelo de carga a veces cambian y se podría complementar información adicional.
- En tercer lugar, para sistemas de mayor voltaje, como el sistema de transmisión, generalmente resulta difícil para los operadores del sistema acceder a los dispositivos de carga, lo que dificulta la aplicación del enfoque de modelado de carga basado en componentes, por último, las mediciones son información esencial y valiosa para que los operadores del sistema perciban las condiciones de funcionamiento que no pueden simplemente descuidarse.

3.8.2. Desarrollo de Modelos de Carga Mediante un Enfoque Basado en Mediciones

El enfoque basado en mediciones se ha desarrollado junto con mejoras de hardware y software desde la década de 1980. En los últimos años se instalaron ampliamente dispositivos de medición, líneas de transmisión y redes de comunicación, lo que convirtió al sistema eléctrico en un sistema basado en datos, más importante aún, la calidad de los datos de las mediciones mejora significativamente, lo que permite un modelado preciso y un control exacto.

3.8.2.1. Ventajas y Desventajas del Enfoque Basado en Mediciones

El enfoque basado en mediciones es más simple porque puede registrar directamente la respuesta dinámica de las cargas en un alimentador, lo que captura los cambios temporales de la carga, además, dicho enfoque se puede aplicar a cualquier tipo de carga.

Las desventajas se concentran principalmente en las mediciones registradas, cuando no se dispone de datos de medición de perturbaciones adecuados, no habrá resultados en los modelos de carga adecuados, dado que no se puede obligar al sistema a producir grandes perturbaciones, se requieren observaciones a largo plazo hasta que se midan las grandes perturbaciones. En ocasiones, para el enfoque basado en mediciones, falta información suficiente sobre las perturbaciones, además, es difícil identificar el modelo de carga cuando hay retrasos o discontinuidades en la respuesta de la carga, por último, al igual que muchos otros problemas de optimización, los parámetros óptimos obtenidos pueden no ser el resultado óptimo global.

3.9. NORMAS Y DIRECTRICES DEL DESARROLLO DE MODELOS DE CARGA

El enfoque basado en mediciones representa principalmente la técnica de identificación de parámetros en la que se obtendrían parámetros complicados basándose en unos pocos procesos. Específicamente, hay seis procesos para el enfoque basado en mediciones: recopilación de datos, procesamiento de datos, selección de la estructura del modelo de carga, derivación de parámetros para el modelo de carga, validación del modelo, incluida la detección de eventos, y selección de parámetros derivados del modelo de carga, véase en la Figura 3.6. La ausencia de dicho modelo de carga, en un futuro próximo, puede tener una influencia adversa en las demandas de potencia real y reactiva.

La mayoría de las investigaciones se han centrado en enfoques basados en mediciones dada la creciente disponibilidad de dispositivos de monitoreo instalados en los sistemas de energía, ya que aprovechan los datos de dispositivos como PMU (unidad de medida de fasores), medidores inteligentes, etc. Como uno de los métodos de modelado de carga más frecuentes, su principal ventaja es utilizar datos recopilados de una barra de sistema real sin requisitos para la composición detallada de la carga real, esta condición resume una descripción crítica de los modelos de carga existentes y sus parámetros para estudios de sistemas de energía, incluidos los modelos de carga estática más utilizados como el modelo de carga exponencial, polinómico de segundo orden y lineal y los modelos de carga dinámica como el modelo exponencial, modelo de carga dinámica, y diferentes variantes del modelo de carga dinámica compuesta.

Dependiendo de las características eléctricas de los modelos, esta condición recomienda además un conjunto de directrices para diferentes procedimientos de desarrollo de modelos de carga, incluidos los siguientes aspectos:

- a) Tipos de señales, datos a medir y recopilar.
- b) Procedimiento de recopilación de datos, requisitos de medición, incluida la frecuencia de muestreo, la duración y la ubicación de seguimiento.
- c) Método de procesamiento para el manejo y conversión de señales medidas.
- d) Filtrado y procesamiento de datos, incluida la precisión requerida de los procedimientos de filtrado.
- e) Tipo de pruebas de campo necesarias.

En los últimos años se han instalado ampliamente dispositivos de medición como PMU y contadores inteligentes, y la calidad de la medición ha mejorado continuamente. Las técnicas de modelos de carga basadas en mediciones aprovechan los datos de dichos dispositivos y siguen la denominada metodología "de arriba hacia abajo"; es decir, las características de las cargas conectadas a una subestación y alimentadores típicos se derivan en función de las perturbaciones registradas del sistema.

Dado que el enfoque basado en mediciones se centra en las respuestas estáticas y dinámicas de las cargas, esta metodología también se conoce como "basada en el comportamiento". Idealmente, los monitores y registradores capturarán todas las respuestas de las cargas

conectadas a los alimentadores bajo todo tipo de perturbaciones que ocurren a un nivel de voltaje más alto, como se ilustra en la Figura 3.6. Por lo tanto, el cuadrado sólido indica un monitor de voltaje en el bus de carga, y los círculos sólidos representan monitores de corriente en los alimentadores. El sistema se monitorea durante el funcionamiento normal y las respuestas de la carga, cuando ocurre una perturbación, también se registran mediante el monitor de calidad de la energía y los grabadores de fallas digitales (DFR).

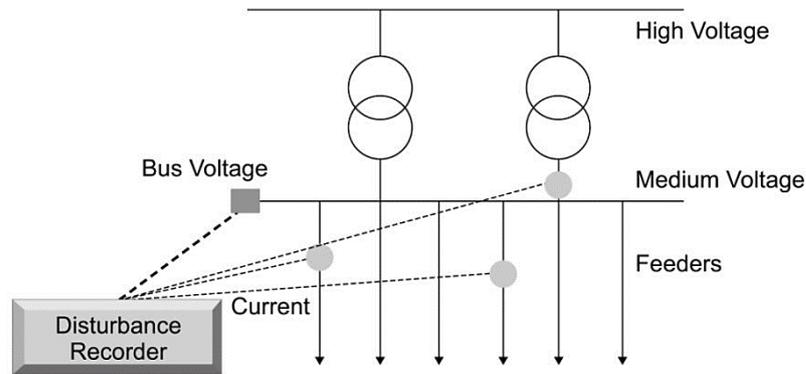


Figura 3.6 Esquema de un ejemplo de registrador de perturbaciones digitales.

3.9.1. Tipos de Señal o Datos a Medir y Pruebas de Campo Necesarias

La base fundamental de los modelos de carga basados en mediciones reside en la disponibilidad de datos de medición del sistema de energía eléctrica. En general, los tipos de señales o datos a medir se derivan de la información sobre fallas proporcionada por el departamento de operaciones de una empresa que suministra servicios de red. La medición típicamente abarca la frecuencia del sistema, la fase y los valores rms de las corrientes y tensiones trifásicas, además, los cálculos adicionales son necesarios para obtener los valores de las potencias real y reactiva, siendo esenciales para la identificación de los parámetros del modelo de carga.

Un ejemplo concreto es el cálculo de la potencia real y reactiva a partir de la medición de dos canales de señales sinusoidales de corriente y voltaje, que se puede llevar a cabo utilizando las Ecuaciones (3.18) a (3.23).

$$P_a = |U_a| \cdot |I_a|_1 \cos(\theta_{va} - \theta_{Ia1}) + |U_a| \cdot |I_a|_2 \cos(\theta_{va} - \theta_{Ia2}) \quad (3.18)$$

$$P_b = |U_b| \cdot |I_b|_1 \cos(\theta_{vb} - \theta_{Ib1}) + |U_b| \cdot |I_b|_2 \cos(\theta_{vb} - \theta_{Ib2}) \quad (3.19)$$

$$P_c = |U_c| \cdot |I_c|_1 \cos(\theta_{vc} - \theta_{Ic1}) + |U_c| \cdot |I_c|_2 \cos(\theta_{vc} - \theta_{Ic2}) \quad (3.20)$$

$$Q_a = |U_a| \cdot |I_a|_1 \sin(\theta_{va} - \theta_{Ia1}) + |U_a| \cdot |I_a|_2 \sin(\theta_{va} - \theta_{Ia2}) \quad (3.21)$$

$$Q_b = |U_b| \cdot |I_b|_1 \sin(\theta_{vb} - \theta_{Ib1}) + |U_b| \cdot |I_b|_2 \sin(\theta_{vb} - \theta_{Ib2}) \quad (3.22)$$

$$Q_c = |U_c| \cdot |I_c|_1 \sin(\theta_{vc} - \theta_{Ic1}) + |U_c| \cdot |I_c|_2 \sin(\theta_{vc} - \theta_{Ic2}) \quad (3.23)$$

El sistema de notación utiliza las letras P, U, I y θ para denotar la potencia real, voltaje, corriente y ángulo de fase, respectivamente, los subíndices a, b y c indican las tres fases, mientras que 1 y 2 representan los números de canal, por lo tanto, en el proceso de identificación del modelo de carga, se emplea el promedio de los voltajes trifásicos como el voltaje terminal del punto de carga.

Las conexiones de equipos para las pruebas de campo se ilustran en la Figura 3.7 utilizando un diagrama unifilar simplificado, los valores rms de tensión y corriente se obtienen con dispositivos de adquisición de datos digitales, utilizando TP (transformadores de potencial) y TC (Transformadores de corrientes), respectivamente.

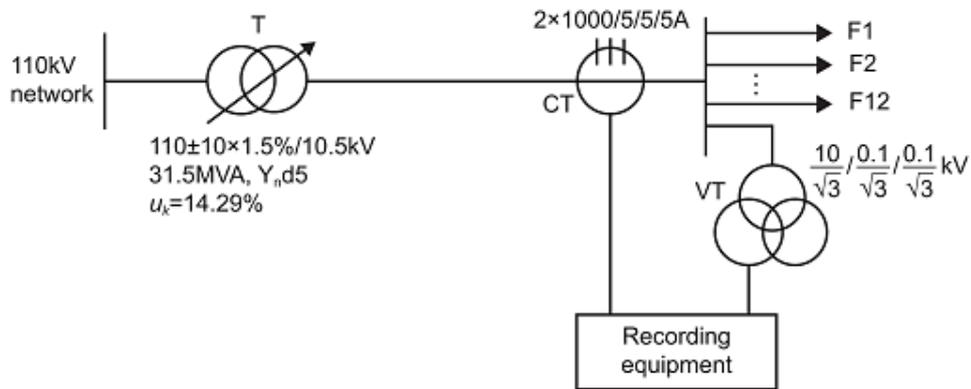


Figura 3.7 Diagrama unifilar simplificado de conexiones de equipos para pruebas de campo

Idealmente, las pruebas de campo se realizarían en diferentes momentos del día, días de la semana y estaciones para obtener características de carga representativas, para mitigar las variaciones naturales de la carga, se recomienda realizar cambios de toma en momentos en que

los cambios de carga no sean significativos, identificables mediante un diagrama de carga diaria. Este enfoque es crucial para el desarrollo de modelos de carga destinados a estudios dinámicos a largo plazo, como la estabilidad de voltaje.

La cantidad de datos históricos necesarios para realizar estimaciones precisas de modelos de carga exige que el período de recolección de datos antes del evento específico sea amplio para asegurar una evaluación exacta de los parámetros del modelo.

Por lo tanto, la duración óptima de este período previo varía dependiendo de la red eléctrica, los tipos de modelos de carga que se quieren estimar y los equipos de medición empleados. Se sugiere generalmente capturar datos durante un intervalo de entre 2 segundos y 10 segundos cuando se usan relés de protección con capacidades de registro de datos, o entre 40 segundos y 70 segundos para registradores de perturbaciones estándar con interfaces analógicas.

3.9.2. Procedimientos de Recopilación de Datos

La recopilación de datos después de una perturbación del sistema debería incluir voltajes y corrientes con marca de tiempo para cada fase. La ubicación óptima para monitorear un solo alimentador o múltiples alimentadores es el lado BT de un transformador de subestación de distribución.

Para llevar a cabo la tarea de recolección de datos necesarios para el análisis y estimación de modelos de carga, se pueden emplear varios tipos de equipos de adquisición de datos. Sin embargo, en esta situación específica, se optará por utilizar un medidor que ya ha sido instalado previamente, el dispositivo de monitoreo utilizado para el enfoque basado en mediciones cubriría un conjunto mínimo de requisitos, véase en la Tabla 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3.

Tabla 3.1 Requisito mínimo de configuración de entrada.

Especificaciones para entradas	
Números de canales analógicos	Mínimo seis canales. Tres de ellos para corrientes de fase y los otros tres para tensiones de fase para monitorear un alimentador.
Números de canales digitales	No es necesario para el modelado de carga.
Tasa de muestreo	Al menos 960 muestras por segundo por canal, o una frecuencia de muestreo de 1 kHz o superior.

Tabla 3.2 Requisito mínimo de configuración de conjunto de datos.

Especificaciones para conjuntos de datos	
Tiempo de grabación de prefalla (ciclos)	Mínimo de dos a cinco ciclos de datos previos a la falla.
Tiempo de registro posfalla (ciclos)	La capacidad máxima de almacenamiento y el umbral de reinicio forman la función de posfalla. Para grandes perturbaciones (por ejemplo, fallos), varios segundos de datos serían suficientes. Se necesita un conjunto de datos de varios minutos para desarrollar modelos de carga para estudios de estabilidad de voltaje a largo plazo.
Condición de activación	Subtensión/sobretensión; Sub/sobrefrecuencia.
Umbral de activación	Usuario definido.
Umbral de activación	Definido por el usuario (incluida la duración de grabación especificada).

Tabla 3.3 Requisito mínimo de configuración de hardware.

Especificaciones de hardware	
Almacenamiento en disco duro	Hasta decenas de segundos de datos para capturar eventos de recuperación lenta de voltaje.
Puertos seriales	USB/RS232
Conexión Ethernet, protocolos de red	Deseable
Formatos de archivos de datos	
ASCII, binario, COMTRADE	

Diferentes modelos de carga requieren velocidades de muestreo diversas, que van desde 1 ms (1 kHz) hasta 1 s (1 Hz). La dinámica captura la disponibilidad de datos y la capacidad de los equipos de medición, y la frecuencia de muestreo se determina según los modelos de carga reales utilizados, por lo tanto, la precisión del modelo de carga está influenciada por la frecuencia de muestreo utilizada en la recopilación de datos.

La Tabla 3.4 enumera las diferentes frecuencias de muestreo necesarias para distintos modelos de carga, como alternativa, se puede utilizar hardware de adquisición de datos analógicos que admita una mayor frecuencia de muestreo y transferencia de datos a una computadora.

Tabla 3.4 Tasa de muestreo versus desarrollo del modelo de carga.

Tasa de muestreo hasta	Modelo de carga obtenido	Nivel de confianza
1 ms	Estático + Dinámico/ZIP + IM	Alto
	Modelo de carga armónica (solo armónicos inferiores)	Media/Baja
10 ms	Dinámico/IM	Medio
	Estático/ZIP	Alto
100 ms	Dinámico /IM	Bajo
	Estático/ZIP para estabilidad de frecuencia y voltaje	Alto
	Estático/ZIP para estabilidad transitoria	Bajo
---	Estático/ZIP para estabilidad de frecuencia	Medio
	Estático/ZIP para estabilidad de voltaje	Altura media
---	Estático/ZIP para estabilidad de frecuencia	Bajo
	Estático/ZIP para estabilidad de voltaje	Medio
1 – 15 minutos	Estático P, Q Carga	Medio bajo

Las mediciones deben realizarse en puntos y regiones críticas de carga para el modelado de cargas industriales, ya que estas cargas muestran un comportamiento dinámico típico y para identificar mejor los parámetros del modelo de carga, se necesitan variaciones suficientes en las series temporales de datos de tensión, potencia real y reactiva recopilados durante perturbaciones.

3.9.3. Procedimientos de Procesamiento y Conversión de Datos

Antes de llevar a cabo un análisis para la identificación del modelo de carga, es necesario realizar un procesamiento adicional y filtrado de los datos recopilados tras las perturbaciones del sistema.

Los pasos esenciales en este proceso incluyen:

- a) Identificación de la ubicación de los datos recopilados en el lado BT o AT.
- b) Implementación de un procedimiento de pre-procesamiento de datos para filtrar aquellos que presenten variaciones significativas de voltaje y potencia durante los períodos de registro.
- c) Cálculo de los valores de potencia real y reactiva a partir de los datos originales recopilados.
- d) Identificación del modelo de carga basándose en los datos de medición procesados.

3.9.4. Procedimientos de Limpieza de Datos

La recopilación precisa de todos los datos necesarios representa un desafío considerable y puede ser costosa, por ello, la presencia de datos faltantes o corruptos durante el proceso de recopilación y transferencia es común, debido a diversos factores como mal funcionamiento de los dispositivos de monitoreo, fallos de comunicación y cortes de equipos. La existencia de datos de baja calidad puede resultar en análisis engañosos, por lo que es esencial identificar y corregir con precisión estos datos de baja calidad (ruido). Dado que en la mayoría de los casos el ruido de medición es de tipo gaussiano, un filtro de promedio simple se presenta como un método potencialmente eficaz para depurar los datos recopilados.

3.9.5. Estructura del Modelo de Carga

Los modelos de carga más comúnmente empleados se pueden clasificar en dos categorías principales: modelos de carga estática y modelos de carga dinámica, como se ilustra en la Figura 3.8.

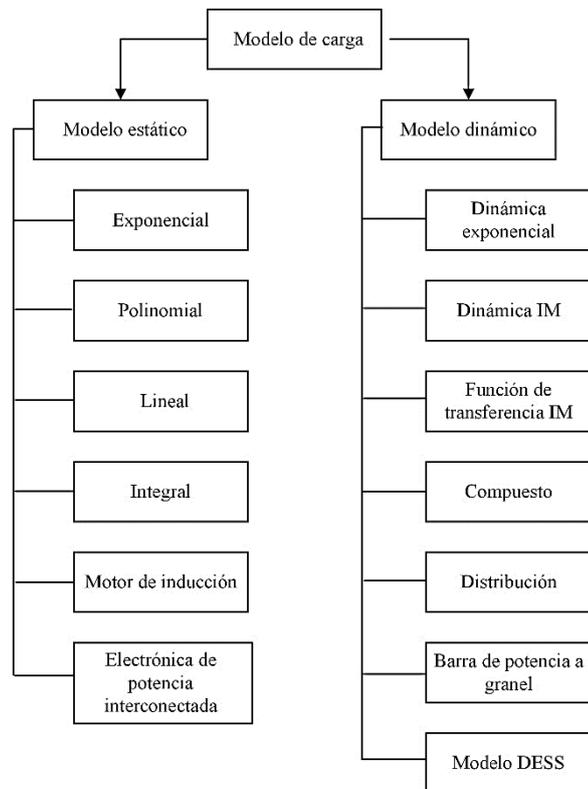


Figura 3.8 Clasificación del modelo de carga.

Para integrar los modelos de carga física en las plataformas de análisis del sistema eléctrico, se pueden emplear dos estructuras de modelos de carga recomendadas, las cuales incorporan tanto características estáticas como dinámicas de las cargas:

a) Modelo polinomial estático ZIP, complementado con un modelo IM de tercer orden basado en ecuaciones diferenciales.

b) Modelo estático exponencial, mejorado con una ecuación en diferencias que representa la relación entrada-salida, siguiendo el modelo de orden.

3.10. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CARGA

Es un paso crucial en la integración de modelos de carga física en las plataformas de análisis del sistema eléctrico, por lo tanto, este proceso implica el uso de herramientas comerciales de simulación en el dominio del tiempo para analizar el comportamiento del sistema eléctrico con modelos de carga específicos.

En primer lugar, se lleva a cabo la derivación de las respuestas del modelo en términos de potencia real y reactiva, considerando los parámetros del modelo y el voltaje registrado en el sistema, por lo que, estas respuestas simuladas son fundamentales para comprender cómo la carga afecta el rendimiento general del sistema eléctrico.

La siguiente etapa implica una comparación minuciosa entre las respuestas simuladas y las respuestas medidas en el sistema real, entonces, esta comparación se realiza, evaluando la precisión del modelo en reproducir el comportamiento observado, así que, se establecen criterios predeterminados para determinar si las respuestas concuerdan adecuadamente.

En caso de que las respuestas simuladas no cumplan con los criterios establecidos, se inician ajustes adicionales en el modelo de carga, estos ajustes pueden involucrar modificaciones en los parámetros del modelo, como los valores asociados con la carga eléctrica. El objetivo es mejorar la concordancia entre las respuestas simuladas y medidas, garantizando una representación precisa de la carga en el sistema [21].

CAPÍTULO IV

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se aborda la metodología y materiales empleados. En la sección 4.1 se menciona el diseño del sistema, mientras que en la sección 4.2 se presenta la implementación del mismo sumado a los criterios para su desarrollo.

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto aborda aspectos importantes para el desarrollo, véase la Figura 4.1.

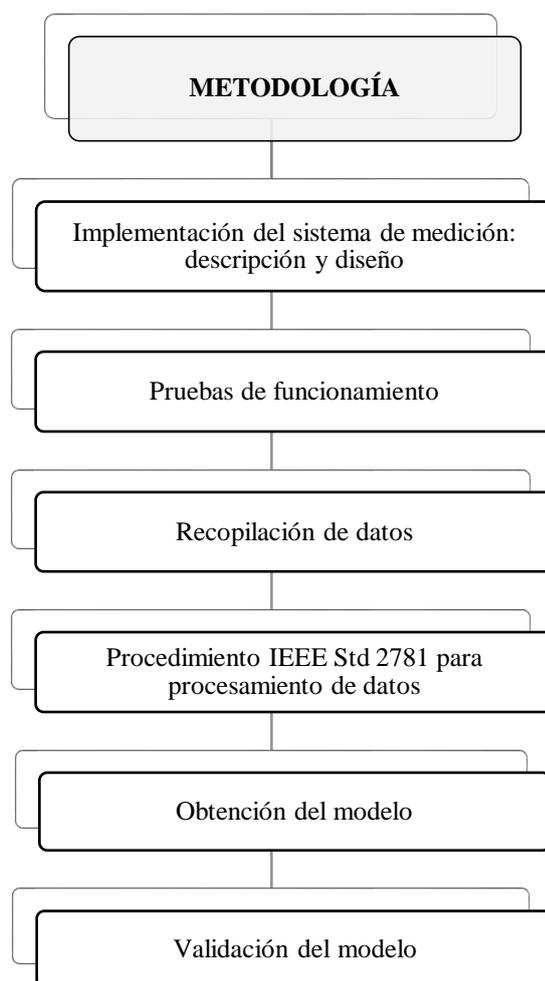


Figura 4.1 Descripción general de la metodología usada para el desarrollo del proyecto.

4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

4.1.1. Descripción Inicial del Tablero Principal del Bloque A y B

La cabina de generación de la Universidad Técnica de Cotopaxi cuenta con un gabinete principal mismo que alimenta las aulas del edificio, laboratorios, oficinas, pasillos, estos componen los Bloques A y B, esto se muestra en la Figura 4.2. Además, en el sistema de bombeo, la alimentación parte del gabinete principal, donde se encuentra un interruptor de caja moldeada de 350 amperios. El conjunto de bombas trifásicas de 25 HP presenta la particularidad de no contar con protección contra sobrecorriente, lo que puede afectar el tiempo de funcionamiento de las unidades y alterar las características del sistema eléctrico. Además, el banco de condensadores desempeña un papel crucial en la modificación del factor de potencia, influyendo en el ángulo de desfase (o ángulo de fase) entre la corriente y modificando la potencia reactiva del sistema eléctrico.

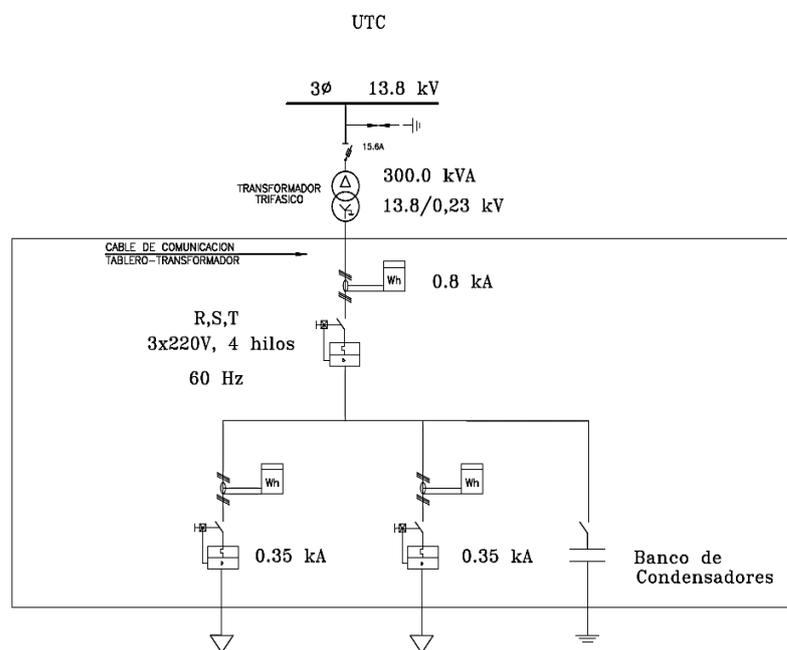


Figura 4.2 Diagrama unifilar del tablero principal de la UTC.

La evaluación precisa de las variables eléctricas se vuelve esencial en proyectos vinculados a la demanda energética, la calidad de energía y la planificación del sistema eléctrico. Para llevar a cabo una supervisión en tiempo real de dicho sistema, resulta imperativo la implementación de medidores inteligentes. Estos dispositivos avanzados no solo permiten la

recopilación de datos en tiempo real, sino que también posibilitan un análisis más detallado y preciso de la información eléctrica.

La utilización de medidores inteligentes proporciona una visión integral y actualizada del comportamiento del sistema eléctrico, permitiendo una adaptación dinámica a las variaciones en la demanda y asegurando una mayor eficiencia operativa, asimismo, la incorporación de esta tecnología facilita la identificación temprana de posibles problemas o anomalías en el sistema, posibilitando una intervención proactiva para evitar fallos o interrupciones no planificadas. En este contexto, la descripción de los elementos que conforman el sistema de medición se presenta como un paso fundamental. Estos componentes, que abarcan desde sensores avanzados hasta interfaces de comunicación, desempeñan un papel crucial en la recopilación, transmisión y análisis de datos eléctricos. La comprensión detallada de estos elementos resulta esencial para asegurar un desempeño óptimo del sistema de medición y, por ende, del sistema eléctrico en su conjunto.

4.1.1.1. Descripción del sistema eléctrico del tablero principal

En la actualidad, el cuarto de máquinas opera con seis unidades de bombeo trifásicas de 25 HP cada una, que reciben alimentación desde el armario principal. Estas unidades están respaldadas por circuitos de fuerza y circuitos de automatismo-control. A pesar de su funcionamiento eficiente, se identifica una carencia significativa en la falta de lecturas en tiempo real de parámetros cruciales para el sistema.

Estos parámetros incluyen voltaje, corriente, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva, los cuales son esenciales para realizar un análisis detallado de la energía suministrada al sistema. La ausencia de estas lecturas en tiempo real impide la verificación de datos relevantes para el funcionamiento actual de las máquinas de bombeo. Por lo tanto, la incorporación de un sistema de monitoreo en tiempo real para estos parámetros resultaría fundamental para optimizar el rendimiento del cuarto de máquinas y garantizar un análisis de la operación de las bombas, véase la Figura 4.3.



Figura 4.3 Gabinete principal de alimentación al cuarto de bombas y cuarto de bombeo

Este proyecto se centra en la obtención de datos precisos sobre el rendimiento de las unidades de bombeo mediante la implementación de un sistema de medición en tiempo real. El objetivo es verificar continuamente el funcionamiento adecuado de estos equipos, además, se incorporará un modelo matemático de carga para analizar en detalle las variables clave, permitiendo identificar patrones y áreas de mejora. Esta combinación de medición en tiempo real y análisis matemático fortalecerá la capacidad de supervisión, contribuyendo a la optimización del rendimiento de las unidades de bombeo y facilitando decisiones informadas para mejorar la eficiencia operativa a largo plazo.

El enfoque secundario de este proyecto radica en la incorporación de un gabinete de medidores inteligentes que mediante la conexión a ethernet suban la información a la plataforma facilitando su evaluación y análisis a través de un modelo de carga polinomial.

El modelo permitirá la interpretación de las mediciones obtenidas de las unidades de bombeo, contrastándolas con estándares de calidad energética y desempeño de las máquinas. Esta metodología proporcionará una visión más detallada y precisa, permitiendo no solo verificar el funcionamiento de las unidades de bombeo, sino también identificar posibles áreas de mejora en términos de eficiencia y cumplimiento de estándares energéticos.

4.1.2. Diseño del Sistema de Medición Inteligente

Tras la inspección del cuarto de máquinas y el gabinete al que se suministran, se ha detectado la necesidad imperativa de implementar un sistema de medición en tiempo real. En consecuencia, es

esencial diseñar un sistema integral de medición y control de datos que abarque los siguientes aspectos críticos:

- **Gabinete para medidores:** Se evidencia la carencia de un gabinete en el que se pueda incorporar el medidor inteligente por tanto se plantea instalar uno en la cámara de generación misma que en la zona lateral derecha consta de gabinetes principales y secundarios que proveen de energía eléctrica a las instalaciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi.
- **Medidor inteligente:** Medidor que tome lectura en tiempo real de las variables requeridas y los suba a una plataforma.
- **Transformadores de corriente:** TC acorde a dimensión de los conductores, permitiendo mediciones seguras y precisas reduciendo la corriente del sistema y estando aislados eléctricamente de los conductores.
- **Rack RJ45:** Se muestra una carencia de un Rack RJ45 en los gabinetes de alimentación principal y secundarios, por tanto, es meritoria su incorporación para el funcionamiento del medidor inteligente.
- **Router:** Dado que el medidor requiere un sistema que envíe los datos a la plataforma se requiere un router para este accionar.
- **Porta fusibles y fusibles:** Para garantizar la protección contra sobre corrientes y funcionamiento adecuado del sistema de medición en tiempo real es necesaria la incorporación.
- **Integración del sistema:** Cableado de control para el sistema de medidores inteligentes y verificación de funcionalidad.

4.1.2.1. Equipos y materiales utilizados

4.1.2.1.1. Medidor EKM Omnimeter Pulse v.4

El medidor EKM Omnimeter Pulse v.4 – Pulse Counting, Relay Controlling, Universal Smart Electric Meter es un dispositivo diseñado para aplicaciones de medición de variables eléctricas, ofrece una amplia gama de variables a medir. Además, cuenta con un software EKM Metering para donde guarda los datos obtenidos.

Este dispositivo se comunica a través de RS-485 con la puerta de enlace EKM Push3 o el convertidor USB EKM Blink. Cuenta con la aprobación La Multinacional Norteamericana

4.1.2.1.3. Transformador de Corriente de Núcleo Dividido Split-Core ct, 400A

El TC Split-core, 400 A es un dispositivo usado para medir corriente de equipos, en este caso particular para motores de inducción de corriente alterna, constituye versatilidad al dividir su núcleo y permitir que el conductor ingrese. En el Anexo D se evidencian sus características. En la Figura 4.6 se muestra al TC utilizado.



Figura 4.6 TC Split-core, 400 A [24].

4.1.2.1.4. Cálculo del Burden del Transformador de Corriente 400A a 26.6mA

La carga de un Transformador de Corriente (TC) se refiere a la carga que se conecta sin afectar de manera errática la precisión del dispositivo. Por lo tanto, puede considerarse como la capacidad de potencia del transformador de corriente [25]. En el Anexo B visualiza la resistencia del conductor de cobre. A partir de la Ecuación (4.1) obtendremos las pérdidas de las líneas.

$$P_L = R_L * I^2 \quad (4.1)$$

Donde:

P_L : Pérdida de potencia (W)

R_L : Resistencia del conductor (A)

I : Corriente del conductor (Ω)

Se inicia por calcular la impedancia del cable 20 AWG dada la Ecuación (4.1)

$$R = \rho * \frac{l}{S} \quad (4.1)$$

Donde:

R : Resistencia del conductor

ρ : Resistividad del conductor

l : Longitud total del conductor

S : Diámetro del conductor

Por tanto:

$$S = 0.519 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{Cu} = 0.017241 \Omega * \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$l = 2 * 1.8288 \text{ m}$$

$$l = 3.6576 \text{ m}$$

$$R = 0.017241 * \frac{3.6576}{0.519}$$

$$R = 0.122 \Omega$$

Por consiguiente:

$$P_L = 0.122 * (0.0266)^2$$

$$P_L = 8.63 \times 10^{-5} \text{ W} \quad - - S = 8.63 \times 10^{-5} \text{ VA}$$

4.1.2.1.5. *Gabinete Metálico Liviano 60x40x20*

Los tableros eléctricos son gabinetes que reúnen dispositivos eléctricos y electrónicos. Su función es asegurar el correcto funcionamiento de una instalación eléctrica al coordinar de manera eficiente todos estos elementos. Estos son fundamentales para garantizar la operatividad segura y coordinada de los componentes eléctricos en una infraestructura.

4.1.2.1.6. *Fusibles y Porta Fusibles*

Los fusibles son cruciales para prevenir daños eléctricos ante sobrecargas o cortocircuitos. Su presencia es fundamental en instalaciones residenciales, comerciales e industriales, así como en aplicaciones de media y alta tensión [26]. Para la protección del medidor inteligente el

fabricante propone en su catálogo incluir fusibles de 1 ampere mismos que serán conectados en línea para salvaguardar la integridad del elemento.

4.1.2.1.7. *Borneras*

Para el desarrollo práctico de la instalación del gabinete de medidores inteligentes conexasionado fueron necesarios estos elementos para el empalme de los circuitos de alimentación, control y medición.

4.1.3. **Instalación del Medidor en la Cámara de Generación de la Universidad Técnica de Cotopaxi**

En la implementación, se abordó la gestión de acceso de manera idónea. Esto incluyó la instalación del gabinete con el medidor para el cuarto de bombeo sanitario, conexión de TCs para toma de datos correspondientes a corrientes AC, vinculación de medidor a la cuenta EKM para contar con el historial en la nube.

4.1.3.1. **Ubicación del sistema de medición**

Para la instalación del sistema de medición, se consideró la disposición del entorno en la cámara de generación y se colocó el gabinete a 1.6 metros de altura a nivel del suelo.

Para ello se tomaron en cuenta pautas clave para ubicar el sistema de medición entre ellas están:

- **Ubicación del Gabinete:** Se ubicó en el extremo derecho de la cámara de generación.
- **Distancia de separación:** En esta ubicación se consideran distancias apropiadas entre gabinetes tomando en cuenta espacio proporcionado en la cámara de generación.
- **Resistencia al entorno:** Dado que el sistema de medición estará en la cámara de generación el gabinete cumplirá el rol de protección contra: partículas de polvo, humedad, vibración, estrés térmico y agentes externos ajenos al sistema de medición.
- **Requerimientos de alimentación y comunicación:** La ubicación proporcionada cumple con el factor alimentación al equipo y comunicación vía ethernet.

Por tanto, la ubicación proporcionada en la cámara de generación cumple con los requerimientos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. En el Anexo F se muestran los avances del sistema de medición. El resultado se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7 Sistema de medición inteligente.

4.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para la instalación del medidor inteligente se inició por el armado del tablero en conjunto con todos los elementos que componen el sistema de medición post a ello se comprobó el funcionamiento de:

4.2.1. Circuito de Fuerza

El diseño del circuito de fuerza se basó en el diagrama unifilar representado en la Figura 4.8. En dicho diagrama, se observa la alimentación proveniente de un sistema trifásico más neutro. Para realizar la medición de corrientes, se emplean transformadores de corriente (TCs) específicos, los cuales se conectarán a los conductores ubicados después de la protección termomagnética encargada de suministrar energía a la sala de bombeo. Este enfoque asegura una medición precisa y controlada de las corrientes en el sistema.

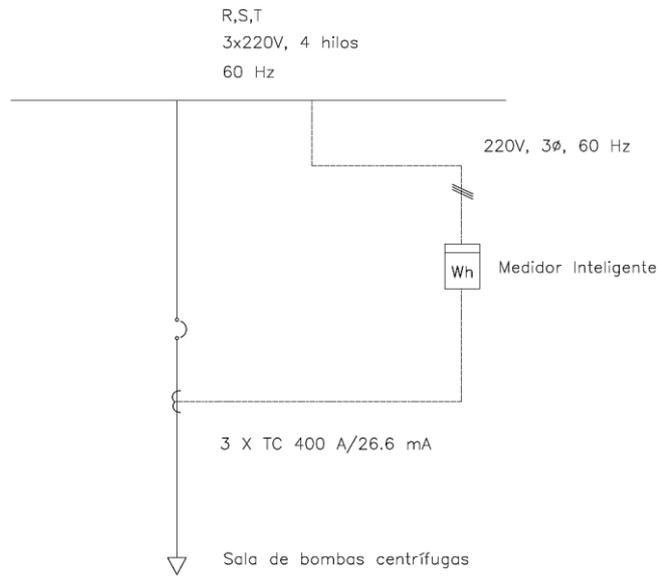


Figura 4.8 Diagrama unifilar del medidor inteligente.

En la Figura 4.9, se presenta el circuito multifilar del sistema de medición, el cual consta de tres fases identificadas como R, S y T, asociadas a los colores negro, rojo y azul, respectivamente. Estas fases ingresan a los portafusibles y posteriormente suministran energía a los medidores y al tomacorriente. La asignación de colores facilita la identificación y seguimiento de las conexiones eléctricas, garantizando una configuración ordenada y segura del sistema de medición para ello se consideró el código de colores mostrado en la Normativa Eléctrica Ecuatoriana (NEC). Además, esta disposición facilita la rápida detección de posibles inconvenientes o mantenimientos, contribuyendo así a la eficiencia y confiabilidad del circuito.

Tabla 4.1 Código de colores de acuerdo a la NEC [24].

Código de colores	
Conductor	Color
Neutro	Blanco
Tierra	Verde, verde con franja amarilla
Fase	Rojo, azul, negro, amarillo o cualquier otro color diferente a neutro y tierra

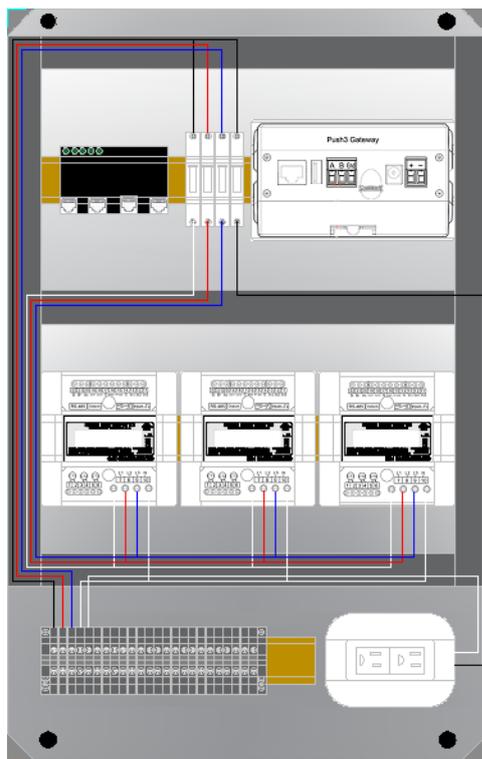


Figura 4.9 Diagrama multifilar del medidor inteligente circuito de fuerza.

4.2.2. Circuito de Control

En el diseño del circuito de control, se ha tomado en cuenta el diagrama multifilar representado en la Figura 4.10. Este diagrama ofrece una visión inicial de la alimentación tanto a EKM Plus como al rack. Asimismo, presenta las conexiones de los medidores (A, B y Gnd), la conexión de ethernet y, por último, detalla la conexión de los Transformadores de Corriente (TCs) de cada medidor.

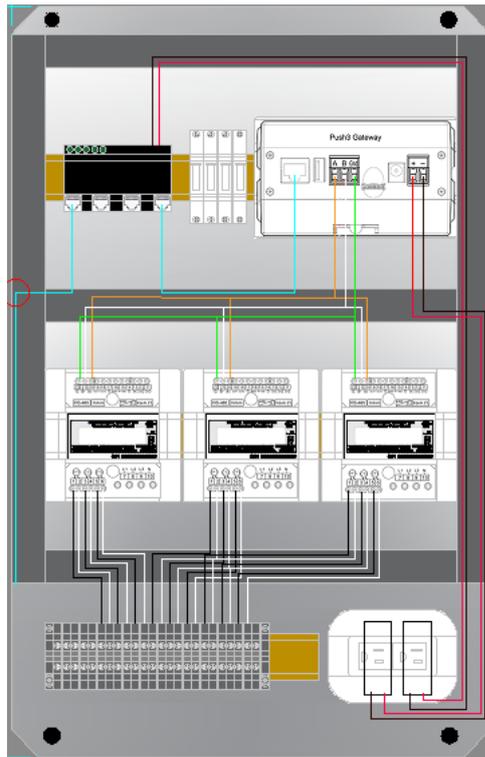


Figura 4.10 Diagrama multifilar del sistema de medición.

4.2.3. Comunicación RS-485

La comunicación RS-485, actualmente conocido como EIA/TIA-485, constituye una interfaz estándar en la capa física de comunicación. Se trata de un método para la transmisión de señales, que corresponde al primer nivel del modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos). Para el desarrollo del sistema de medición se comprobó la conexión. En la Figura 4.11 se evidencia la comunicación del medidor inteligente.



Figura 4.11 Comunicación RS 485.

4.2.4. Funcionamiento del Medidor

Post a la comunicación y configuración del medidor inteligente se verifico la lectura en tiempo real denotando como precedente de funcionamiento y conexión a internet el indicador luz verde en EKM Push, esto se verifica en la Figura 4.12.



Figura 4.12 Funcionamiento de conectividad a internet.

4.3. RECOPIACIÓN DE DATOS

4.3.1. Lectura del Medidor Inteligente y Verificación de Datos en la Nube EKM

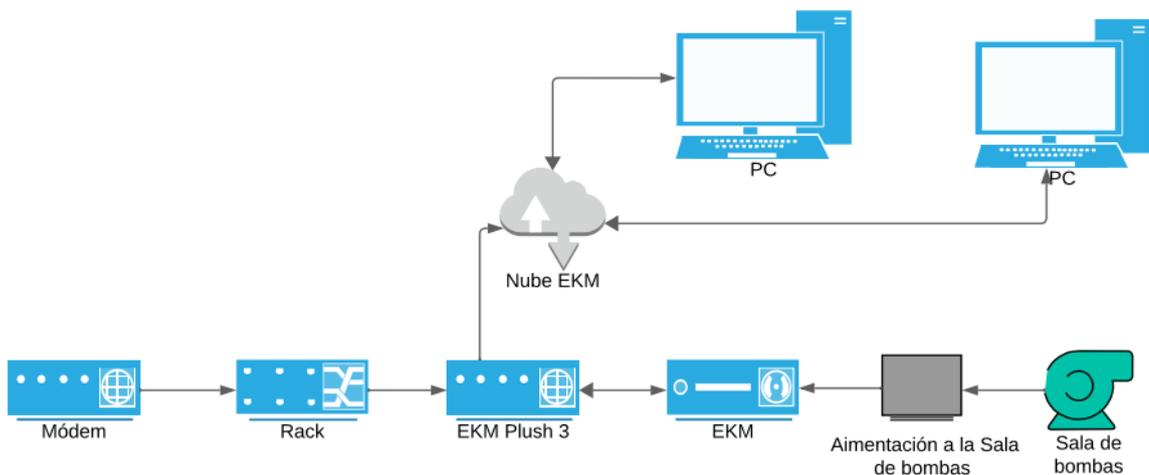


Figura 4.13. Diagrama del prototipo.

Los omnímetros EKM se comunican a través de RS-485 con la puerta de enlace EKM Push3 o el convertidor USB EKM Blink. RS485 es un estándar ampliamente empleado en comunicaciones para aplicaciones de adquisición y control de datos. Una de sus ventajas

principales radica en la capacidad de integrar varios dispositivos RS485 en un mismo bus, facilitando así la conexión entre diversos nodos. En la Figura 4.11 y Figura 4.12 se visualiza el funcionamiento en tiempo real del medidor al emitir datos en el sistema acorde a nuestro usuario.



Figura 4.14 Datos en el sistema EKM.



Figura 4.15 Datos de tensión en el sistema EKM.



Figura 4.16 Datos de potencia, voltaje, corriente y factor de línea en el sistema EKM.

4.4. METODOLOGÍA DEL MODELO DE CARGA BASADOS EN MEDICIONES

La Figura 4.17 ilustra un diagrama de flujo representativo del enfoque de modelado de carga basado en mediciones, cabe señalar que es un diagrama de flujo genérico y los detalles de la estructura del modelo de carga con respecto a la norma IEEE Std 2781.

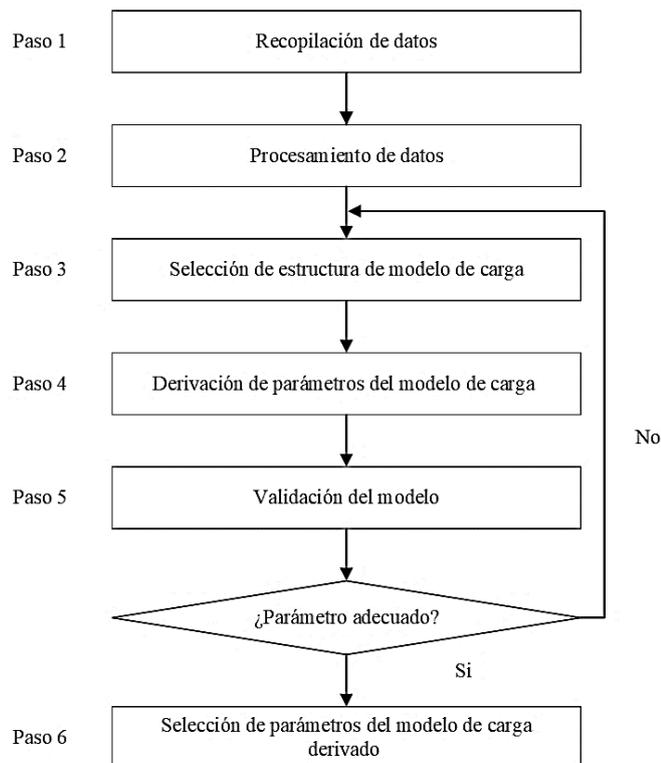


Figura 4.17. Procedimientos típicos del enfoque basado en mediciones IEEE Std 2781.

La siguiente información da a conocer que el enfoque de modelado de carga basado en mediciones, lleva el siguiente proceso:

4.4.1. Paso 1

Recopilar información esencial sobre las perturbaciones en el sistema eléctrico, que debe incluir detalles como la marca de tiempo, así como mediciones de la corriente y el voltaje en el tiempo real para cada fase del sistema, también es importante recoger datos sobre la frecuencia del sistema y las cantidades de potencia, tanto activa como reactiva. Para realizar esta recopilación de datos de manera efectiva, se coloca un dispositivo de monitoreo en un lugar estratégico, típicamente en el lado secundario de un transformador de media tensión, como se muestra en la Figura 3.6.

4.4.2. Paso 2

Se puede emplear un algoritmo de procesamiento de señales u otras técnicas de procesamiento similares para calcular los componentes fundamentales de corriente, voltaje, potencia real y potencia reactiva, en donde diferentes dispositivos utilizan diferentes velocidades de muestreo, finalmente se muestran los requerimientos mínimos de configuración de hardware para dispositivos de grabación de datos, véase la Tabla 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.4.

4.4.3. Paso 3

Elija un modelo de carga apropiado y una estructura de modelo de carga correspondiente, sin embargo, esta es sólo una estructura del modelo de carga inicial, ya que la estructura puede modificarse si no se obtienen los parámetros adecuados del modelo de carga en el Paso 5.

4.4.4. Paso 4

Ejecute una rutina para identificar/determinar los parámetros de los modelos de carga, en donde, para estimar los parámetros de los modelos de carga se han utilizado técnicas utilizadas en estadística y aprendizaje automático.

4.4.5. Paso 5

Validar el modelo de carga derivado, el mismo que para la validación se emplean herramientas de simulación en el dominio del tiempo desarrolladas por el usuario o disponibles comercialmente. Las respuestas de potencia real y reactiva medidas se comparan con las respuestas simuladas correspondientes que se obtuvieron en base a los parámetros finales y los voltajes y frecuencia registrados. Si los resultados de la comparación no satisfacen criterios específicos predefinidos, como un requisito de precisión, el procedimiento se repetiría con un conjunto de nuevos parámetros iniciales o un modelo de carga modificado, si fuera necesario.

4.4.5.1. Errores y métricas de evolución

4.4.5.1.1. *Coefficiente de determinación*

- **$R^2 \geq 0.70$:** Se considera generalmente que un modelo es aceptablemente predictivo si el R^2 es igual o superior a 0.70. Un valor en este rango indica que el modelo puede explicar al menos el 70% de la variabilidad en los datos observados. Para aplicaciones donde se requieren predicciones altamente precisas, se prefieren valores más cercanos a 1.0.
- **$R^2 < 0.70$:** Valores por debajo de 0.70 pueden indicar que el modelo no captura suficientemente la variabilidad de los datos y puede requerir revisión o la inclusión de más variables explicativas.

4.4.5.1.2. *Error medio cuadrático (RMSE)*

- **Valor específico del contexto:** El RMSE debe evaluarse en el contexto de los rangos de valores de las variables de interés. Un RMSE bajo en comparación con el rango de la variable dependiente puede ser indicativo de un buen ajuste. Para sistemas de bombeo, donde los voltajes y corrientes pueden variar significativamente, un RMSE pequeño en comparación con estos rangos indica un modelo más preciso.
- **Comparación entre modelos:** En la ausencia de un valor absoluto de referencia, un RMSE menor en un modelo en comparación con otros indica un mejor ajuste.

4.4.5.1.3. *Error absoluto medio (MAE)*

- **Valor específico del contexto:** Al igual que con el RMSE, el MAE debe ser bajo en relación con el rango de la variable de interés para ser considerado aceptable. Un MAE

menor indica que, en promedio, las predicciones del modelo tienen una desviación menor de los valores reales.

- **Preferencia sobre RMSE:** El MAE es menos sensible a los valores atípicos que el RMSE, por lo que un MAE relativamente bajo puede ser preferible en situaciones donde los valores atípicos son una preocupación.

4.4.6. Paso 6

Seleccionar los parámetros finales del modelo de carga es crucial para determinar si estos reflejan adecuadamente las condiciones específicas del sistema analizado. Si se consideran apropiados, el modelo puede finalizarse; de lo contrario, es necesario seleccionar un nuevo modelo y, posiblemente, una nueva función objetivo para optimizar el ajuste, lo cual implica regresar a una etapa previa de análisis. Este paso subraya la importancia de un ciclo iterativo de evaluación y ajuste en el proceso de modelado, donde la adecuación de los datos recopilados juega un papel fundamental. La incapacidad para obtener un modelo de carga apropiado puede señalar insuficiencias en los datos disponibles, destacando los desafíos de aplicar una metodología basada en mediciones en contextos de ingeniería y análisis de sistemas.

4.4.7. Algoritmo para el Análisis de Datos con MATLAB

La Figura 4.18 ilustra de manera detallada el algoritmo utilizado para el procesamiento de datos y la obtención del modelo en MATLAB, en donde este algoritmo incluye desde el paso 2 hasta el paso 5.

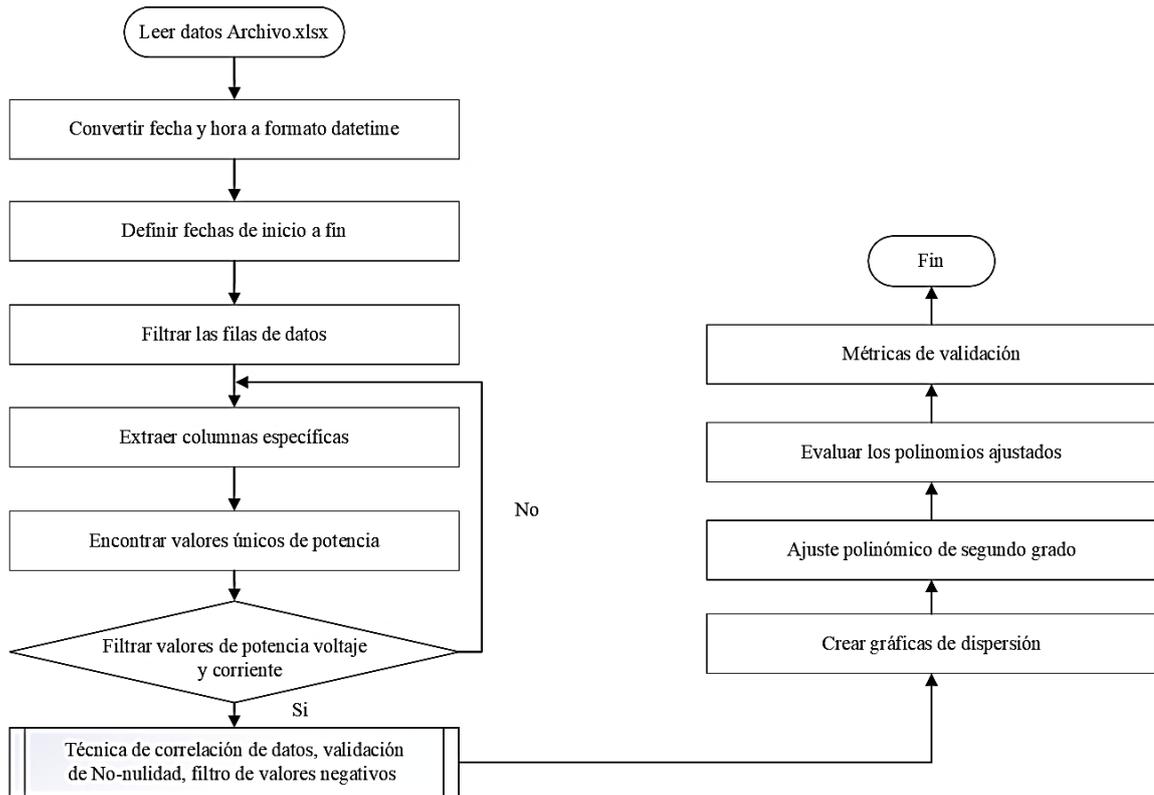


Figura 4.18 Algoritmo de procesamiento de datos y obtención del modelo en MATLAB.

1. **Leer datos desde un archivo de Excel:** Utiliza la función `readtable` para cargar los datos desde un archivo llamado 'DatosPrueba.xlsx'. Esta función convierte los datos del archivo en una tabla en MATLAB, facilitando el manejo y análisis de los datos.
2. **Convertir una columna de fecha y hora a tipo `datetime`:** Se espera convertir los valores de una columna específica a formato `datetime` para poder manejar fechas y horas adecuadamente en MATLAB. Sin embargo, parece haber un error en la línea donde se intenta hacer esta conversión, ya que se refiere a una columna 'Corregido' que no se explica en el fragmento de código compartido. La intención es preparar los datos para poder filtrarlos basándose en rangos de fechas y horas específicos.
3. **Definir fechas de inicio y fin:** Se establecen variables `datetime` para definir un rango de fechas y horas específico. Este rango se usará para filtrar los datos, seleccionando solo aquellos que caigan dentro del periodo de tiempo definido.
4. **Filtrar las filas de datos:** Utiliza condiciones lógicas para seleccionar solo las filas de datos que tienen una fecha y hora dentro del rango establecido. Esto reduce el conjunto de datos a aquellos relevantes para el análisis deseado.

5. **Extraer columnas específicas:** Extrae datos específicos de potencia, voltaje y corriente para tres conjuntos distintos, así como los promedios de voltaje y corriente. Estos datos extraídos se utilizarán para análisis y visualización posteriores.
6. **Encontrar valores únicos de potencia activa:** Identifica los valores únicos en la columna de potencia activa. Esto permite analizar los datos agrupados por cada valor único de potencia, lo que puede ser útil para identificar patrones o tendencias específicas asociadas con diferentes niveles de potencia.
7. **Filtrar valores de potencia, voltaje y corriente:** Aplica criterios de filtrado adicionales para excluir datos que no cumplen con ciertas condiciones, como valores cero o negativos y otros límites específicos. Esto ayuda a mejorar la calidad de los datos para el análisis y asegura que las visualizaciones y ajustes de modelos sean representativos y precisos, para ello se han utilizado las siguientes técnicas.
 - **Técnica de Correlación de Datos:** Esta técnica implica evaluar la relación estadística entre dos variables, como potencia y voltaje o potencia y corriente, para determinar cómo una variable puede influir en la otra. La correlación de datos ayuda a identificar y seleccionar solo aquellos pares de datos que tienen una relación significativa, facilitando así la creación de modelos más precisos. Se pueden utilizar coeficientes de correlación, como el coeficiente de correlación de Pearson, para cuantificar la fuerza y dirección de esta relación. Datos con baja correlación pueden ser candidatos a revisión o exclusión, dependiendo de los objetivos del análisis.
 - **Validación de No-nulidad:** Esta técnica asegura que todos los datos utilizados para el análisis y modelado sean distintos de cero, ya que valores cero pueden no ser válidos en ciertos contextos, como mediciones de corriente o voltaje donde se espera una actividad mínima. La validación de no-nulidad implica revisar el conjunto de datos y eliminar o corregir aquellos registros donde las variables críticas, como potencia, voltaje o corriente, reportan un valor de cero. Esto es especialmente relevante en análisis energéticos donde el cero puede indicar un error de medición o un estado de inactividad no representativo del comportamiento normal del sistema.
 - **Filtro de Valores Negativos:** Dado que ciertas medidas como la potencia, el voltaje y la corriente en contextos específicos no deben tomar valores negativos (dependiendo de cómo se definan y en qué circunstancias se midan), esta técnica implica revisar el

conjunto de datos y excluir aquellos registros con valores negativos. Por ejemplo, en sistemas donde los valores negativos son físicamente imposibles o indican errores de medición, esta filtración es crucial para mantener la integridad del análisis. La implementación de este filtro mejora la calidad de los datos al asegurar que solo se incluyan valores que son coherentes con la realidad física del sistema analizado.

- 8. Crear gráficas de dispersión:** Genera visualizaciones para cada conjunto de datos de voltaje y corriente en relación con la potencia, usando gráficas de dispersión. Estas visualizaciones permiten observar la relación entre la potencia y otras variables, identificando patrones o correlaciones visuales.
- 9. Ajustar polinomios de segundo grado:** Realiza ajustes de regresión polinomial de segundo grado para los datos de voltaje y corriente, calculando coeficientes que describen la relación matemática entre la potencia y estas variables. Esto es útil para modelar y predecir valores de voltaje y corriente basados en la potencia.
- 10. Evaluar los polinomios ajustados:** Utiliza los coeficientes de los polinomios ajustados para generar valores predichos de voltaje y corriente en un rango de potencias. Luego, añade estas curvas de ajuste a las gráficas de dispersión existentes para visualizar cómo el modelo se ajusta a los datos reales.
- 11. Calcular y mostrar métricas de evaluación:** Calcula métricas clave (Coeficiente de determinación R^2 , Error Cuadrático Medio RMSE, y Error Absoluto Medio MAE) para evaluar la calidad del ajuste de los modelos de regresión. Esto proporciona una medida cuantitativa de cuán bien el modelo ajustado representa los datos observados, ayudando a evaluar la precisión y utilidad de los modelos para predicciones o análisis futuros.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presente investigación se enfoca en la "Obtención del Modelo de Carga Polinomial para un Sistema de Bombeo de Agua Sanitaria a partir de Mediciones Experimentales", donde el sistema bajo estudio integra seis motores de inducción operando en paralelo.

Este análisis se propone como una exploración de la dinámica entre la potencia activa y reactiva y su relación con el voltaje y la corriente en un entorno trifásico, caracterizado por mediciones en las líneas L1, L2 y L3. No obstante, se enfrentó un desafío significativo debido a la naturaleza operativa de la bomba, al banco de condensadores instalado, las cargas adicionales existentes; su funcionamiento intermitente, alternando encendidos y apagados sucesivos, impidió la recopilación de un conjunto de datos continuo y estable, esencial para el análisis propuesto.

La metodología convencional para realizar ajustes polinómicos requiere un flujo de datos constante y predecible, condición que no se cumplía en este escenario de medición. Por tanto, se adoptó un enfoque alternativo que implicó la recolección de datos desde la barra principal, donde la potencia presentaba variabilidad natural. Esta adaptación metodológica permitió examinar la relación entre la potencia activa y reactiva junto a las mediciones de voltaje y corriente para cada línea, así como sus promedios, capturando así la esencia de las fluctuaciones de carga y proporcionando una base sólida para el estudio polinomial de las máquinas en funcionamiento.

Para el análisis y contraste de variables correspondientes a: voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva se requirió evidenciarlo a partir de curvas polinómicas obtenidas post a inserción de datos en el código en MATLAB este se muestra en el Anexo G. Dando como resultado curvas polinómicas y coeficientes a, b y c.

Sin embargo, para asegurar la validez del modelo propuesto, es necesario verificar su aplicabilidad utilizando un conjunto de datos independientes, procedentes de un sistema de bombeo distinto al originalmente analizado. Por esta razón, se ha seleccionado el sistema de bombeo de la localidad de El Chaupi como referencia para esta validación, además, se anticipa

llevar a cabo este análisis comparativo con el fin de confirmar la efectividad del modelo polinomial de segundo grado, aplicando la metodología propuesta en este estudio.

5.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON RESPECTO AL BUS PRINCIPAL

En los siguientes apartados se presentan los resultados del ajuste polinómico de segundo grado aplicado a los datos de potencia activa, reactiva, voltaje y corriente. Las gráficas muestran la relación entre la potencia activa, reactiva respecto al comportamiento del voltaje y la corriente, revelando tendencias inusuales y proporcionando una base cuantitativa para el modelado y la interpretación de estos fenómenos eléctricos.

Estos resultados se ven influenciados por encendido intermitente del sistema de bombeo y por el banco de condensadores instalado, el cual resulta en un factor de potencia de 1 en las líneas 1, 2 y 3 respectivamente, véase la Figura 5.1, dependiendo del tipo de carga en funcionamiento. Por lo tanto, dado el impacto de estos factores, el análisis propuesto sugiere que el modelo aplicado puede no ser el más adecuado para este estudio, por lo que sería recomendable considerar datos de otros sistemas de bombeo para validar el modelo propuesto.

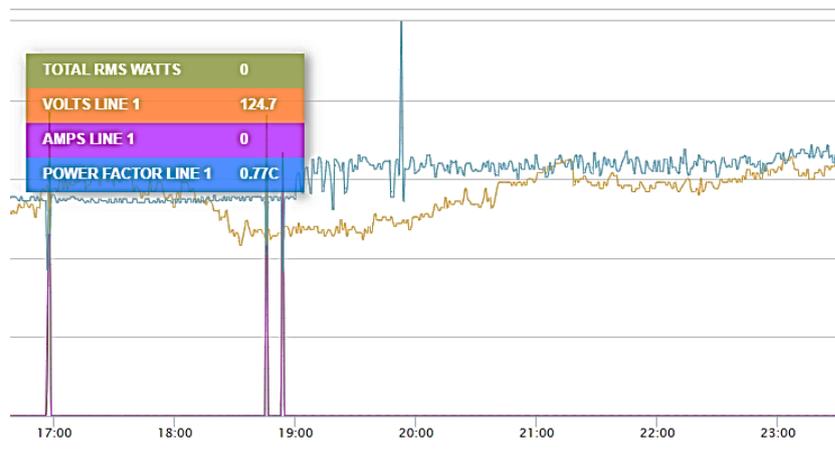


Figura 5.1 Comportamiento del sistema de bombeo, parámetros eléctricos con respecto a la línea 1.



Figura 5.2 Comportamiento de la corriente en la línea 1 del sistema de bombeo.

En la Figura 5.1 y Figura 5.2, se verifica que durante ciertos intervalos de tiempo las unidades de bombeo no están en funcionamiento, lo cual se refleja en la curva de corriente y en los valores totales de watts RMS, los cuales muestran valores de 0 en esos momentos. Además, al tratarse de un sistema trifásico, el factor de línea se ve afectado por la presencia del banco de condensadores. Además, la presencia de otras cargas conectadas al interruptor termomagnético que alimenta la sala de bombas también puede afectar las mediciones tomadas.

5.1.1. Potencia Activa vs Voltaje

Los coeficientes obtenidos reflejan cómo se comporta la potencia activa en respuesta a cambios de voltaje en cada una de las líneas del sistema trifásico y su promedio, véase Anexo I.

Tabla 5.1 Coeficientes de regresión polinomial para potencia activa vs voltaje.

Voltaje	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Voltaje 1	0	0,000037	130,99103
Voltaje 2	0	0,000017	132,95113
Voltaje 3	0	-0,000037	132,74733
Promedio voltaje	0	0,000006	132,22983

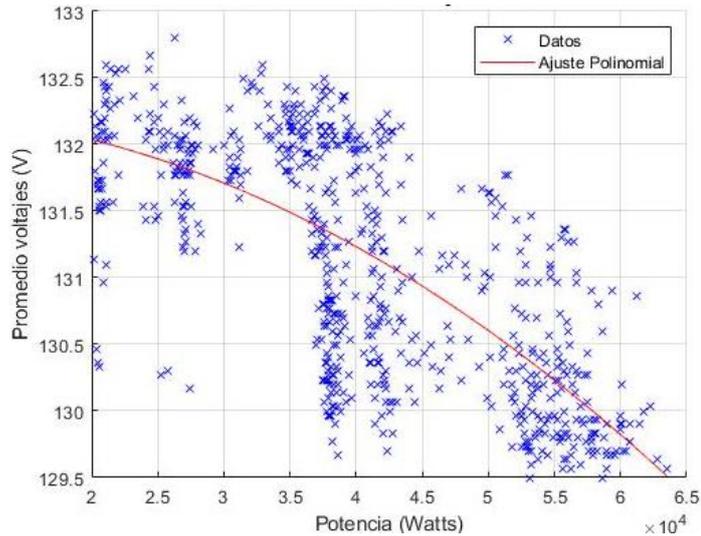


Figura 5.3 Curva de potencia activa vs promedio de voltajes ajuste polinómico.

Los datos analizados para el Voltaje 1 revelan un coeficiente lineal de 0.000037, lo que demuestra que existe un incremento proporcional en la potencia activa con un aumento en el voltaje. Se observa que, por cada unidad de aumento en el voltaje, la potencia activa incrementa en 0.000037 vatios. Este comportamiento se refleja en un término independiente constante de 130.9, interpretado como el voltaje de línea en ausencia de consumo de potencia activa.

Para el Voltaje 2, el análisis muestra un coeficiente lineal de 0.000017 y un término independiente de 132.95113. Este resultado indica un aumento en la potencia activa de 0.000017 vatios por cada unidad de incremento en el voltaje, aunque este efecto es menos pronunciado que en el Voltaje 1. Esto sugiere una relación directa entre el voltaje y la potencia activa, aunque con una sensibilidad reducida.

En contraste, el Voltaje 3 presenta un coeficiente lineal negativo de -0.000037. Este hallazgo indica que la potencia activa disminuye conforme el voltaje aumenta, un fenómeno atípico que podría indicar problemas de regulación de voltaje o desequilibrios en la carga. El término independiente para el Voltaje 3 es de 132.74733, similar al del Voltaje 2, pero la relación inversa entre potencia activa y voltaje destaca y podría influir significativamente en la estabilidad del sistema durante periodos de alta demanda.

El promedio de los coeficientes de las tres líneas es de 0.000006, evidenciando una relación menos directa entre la potencia activa y el voltaje promedio en comparación con las mediciones individuales. El término independiente promedio de 132.22983 sugiere una potencia activa alta

y uniforme a través de las líneas. Este promedio indica que las fluctuaciones específicas a cada línea tienden a compensarse mutuamente, resultando en un comportamiento más estabilizado del sistema en su conjunto.

5.1.2. Potencia Activa vs Corriente

Al igual que con el voltaje, se utilizó un modelo polinómico de segundo grado para estimar la relación entre la potencia activa y la corriente en cada motor y en el promedio del sistema, véase Anexo I.

Tabla 5.2 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia activa vs corriente.

Corriente	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Corriente 1	0	0,007408	-78,031199
Corriente 2	0	0,015878	-203,9715
Corriente 3	0	0,007085	-73,637574
Promedio Corriente	0	0,010124	-118,54676

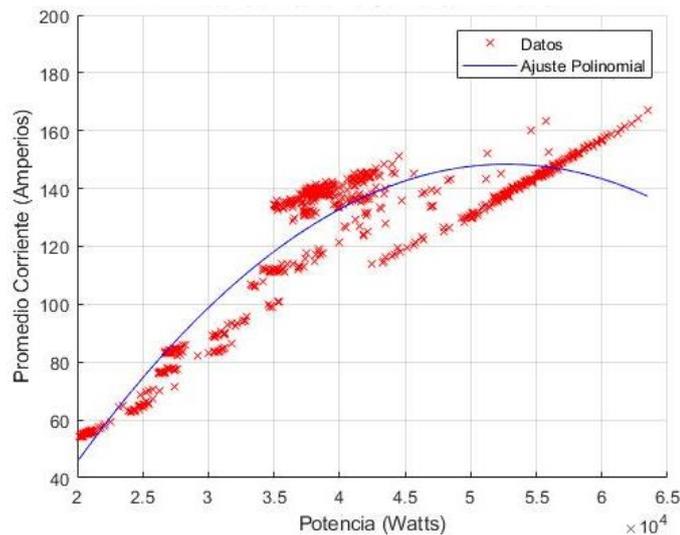


Figura 5.4 Curva de potencia activa vs promedio de corriente ajuste polinómico.

Para Corriente 1, el coeficiente lineal de 0,007408 implica que, por cada watt de aumento en la potencia activa, la corriente aumenta 0,007408 amperios. Este aumento es coherente con lo esperado en sistemas de motores de inducción, donde la corriente debería aumentar con la potencia.

Sin embargo, los términos independientes (c) negativos para todas las corrientes son teóricamente inusuales porque sugieren valores de corriente negativos cuando la potencia activa es cero. En la práctica, se interpreta como un desplazamiento en la medición o un ajuste incorrecto del modelo, posiblemente debido a la variabilidad de los datos o a condiciones anómalas durante la recopilación de datos.

La Corriente 2 tiene el coeficiente lineal más alto de 0,015878, indicando una sensibilidad mayor al cambio en la potencia activa comparado con las otras líneas. Sin embargo, también tiene el valor más negativo para el término independiente, -203,971502, lo que refleja un error de calibración o un comportamiento anómalo del sistema que requeriría una investigación adicional.

El análisis de la corriente promedio muestra un coeficiente lineal de 0,010124, que está en el rango intermedio de los valores observados para las corrientes individuales. El término independiente negativo de -118,546758 para la corriente promedio también refleja esta tendencia general.

5.1.3. Potencia Reactiva vs Voltaje

Tabla 5.3 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs voltaje promedio.

Evaluación	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Voltaje 1	0	0,000259	127,38984
Voltaje 2	0	0,000228	129,24953
Voltaje 3	0	0,000243	127,90976
Promedio Voltaje	0	0,000243	128,18305

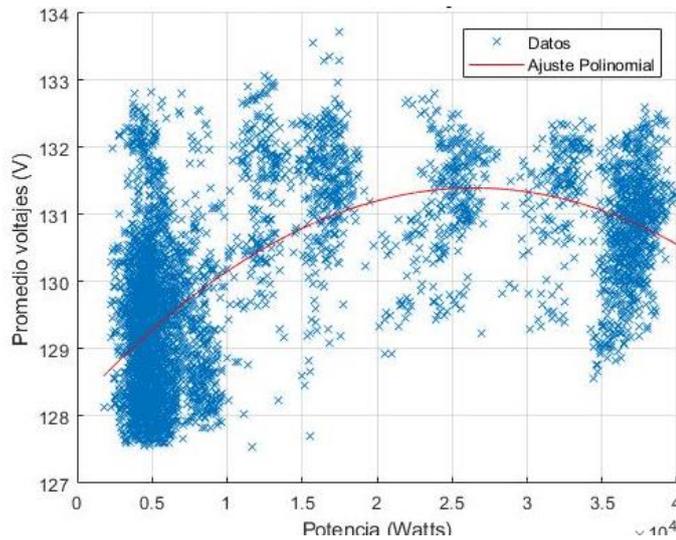


Figura 5.5 Curva de potencia reactiva vs voltaje promedio ajuste polinómico.

Para el Voltaje 1, el coeficiente lineal b es 0,000259, indicando un aumento de 0,000259 voltios por cada watt de potencia activa. El término independiente c , siendo 127,389842 V, representa el voltaje cuando la potencia es nula. El hecho de que el coeficiente cuadrático sea 0 enfatiza una relación directamente proporcional y lineal entre la potencia y el voltaje para esta línea.

En el caso del Voltaje 2, con un coeficiente lineal b de 0,000228 y un término independiente c de 129,249532 V, se sugiere que esta línea tiene una sensibilidad ligeramente menor a las variaciones de potencia en comparación con el Voltaje 1. La línea de Voltaje 2 muestra el mayor valor de voltaje estimado para una potencia activa de cero, lo que puede indicar características de carga o regulación específicas de esa línea.

Para el Voltaje 3, el coeficiente lineal b es 0,000243, y el término independiente c es 127,909763 V. Estos números son consistentes con los hallazgos para las otras dos líneas de voltaje, demostrando una vez más una dependencia lineal entre la potencia y el voltaje.

El análisis del Promedio de Voltaje muestra un coeficiente lineal b de 0,000243 y un término independiente c de 128,183046 V, reflejando un comportamiento promedio de las tres líneas anteriores. Los valores indican que el promedio de voltaje en el sistema también sigue una tendencia lineal con respecto a la potencia activa, véase el Anexo J, donde se muestran los resultados individuales obtenidos.

5.1.4. Potencia Reactiva vs Corriente

Tabla 5.4 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de corriente.

Evaluación	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Corriente 1	0	0,00293	42,87855
Corriente 2	0	0,0044	45,0469
Corriente 3	0	0,0043	37,3989
Promedio Corriente	0	0,00387	41,77477

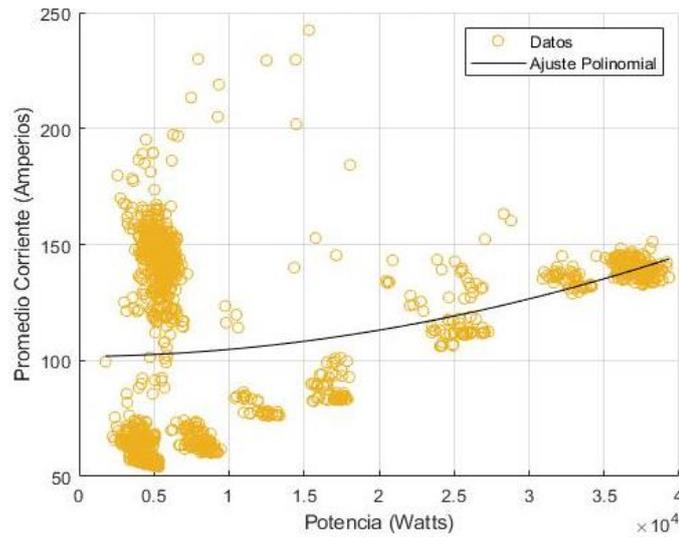


Figura 5.6 Curva de potencia reactiva vs promedio de corriente ajuste polinómico.

En el caso de la Corriente 1, el coeficiente cuadrático (a) igual a cero indica una relación lineal entre la potencia activa y la corriente. El coeficiente lineal (b) de 0.00293 señala una tasa específica de cambio en esta relación, y el término independiente (c) de 42.87855 representa el valor de la potencia activa cuando la corriente es cero en esta línea particular.

Para la Corriente 2, donde nuevamente el coeficiente cuadrático (a) es cero, la relación lineal también está presente. El coeficiente lineal (b) es de 0.0044, indicando una tasa diferente de cambio en comparación con la Corriente 1. El término independiente (c) de 45.0469 representa el valor de la potencia activa cuando la corriente es cero en esta línea específica.

En la Corriente 3, observamos una situación similar, con un coeficiente cuadrático (a) de 0 y un coeficiente lineal (b) de 0.0043. El término independiente (c) es de 37.3989, reflejando el valor de la potencia activa cuando la corriente es cero en esta línea particular.

Considerando el Promedio de Corriente, donde los coeficientes cuadráticos siguen siendo nulos, el coeficiente lineal (b) es de 0.00387, indicando una tasa promedio de cambio en la relación entre la potencia activa y la corriente. El término independiente (c) de 41.77477 representa el valor de la potencia activa cuando la corriente es cero en el promedio de todas las líneas, véase el Anexo J.

5.1.5. Errores y Métricas de Evaluación

5.1.5.1. Potencia Activa vs Voltaje

Tabla 5.5 Errores y métricas de evaluación de potencia activa vs voltajes.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R^2)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Voltaje 1	0,4611	0,6575	0,5374
Voltaje 2	0,5591	0,595	0,4863
Voltaje 3	0,4822	0,6475	0,5276
Promedio Voltaje	0,5064	0,6244	0,5114

Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los voltajes 1, 2, 3 y el promedio de voltaje fueron de 0,4611, 0,5591, 0,4822 y 0,5064, respectivamente. Estos valores indican que, aunque el modelo captura una parte significativa de la variabilidad de los datos, no alcanza el umbral recomendado de 0.70 que sugeriría una capacidad predictiva fuerte y aceptable. Esto señala una oportunidad para mejorar el modelo, posiblemente mediante la inclusión de variables adicionales o el ajuste de la metodología de recolección de datos para capturar más precisamente la dinámica del sistema.

El error medio cuadrático (RMSE) y el error medio absoluto (MAE) para las mediciones de voltaje en el sistema de bombeo, observamos que para el Voltaje 1 se obtuvieron valores de RMSE de 0,6575 y de MAE de 0,5374. Estas métricas, que reflejan el grado de error en las predicciones del modelo respecto a los datos reales, sugieren un nivel de precisión moderado en la capacidad del modelo para predecir el comportamiento del voltaje en respuesta a las variaciones de potencia activa.

Para el Voltaje 2 y Voltaje 3, se observaron tendencias similares en términos de RMSE y MAE. El Voltaje 2 registró un RMSE de 0,595 y un MAE de 0,4863, mientras que el Voltaje 3 mostró valores de RMSE de 0,6475 y MAE de 0,5276. Estos resultados indican una coherencia

en el grado de error a través de las diferentes fases del sistema, lo que sugiere que el modelo mantiene una uniformidad en su capacidad predictiva para diferentes líneas de voltaje.

El Promedio de Voltaje reflejó un RMSE de 0,6244 y un MAE de 0,5114, valores que están en línea con los observados para las líneas individuales. Esto indica que el modelo, a nivel promedio, también ofrece una precisión moderada, lo que es coherente con el análisis individual de cada línea de voltaje.

5.1.5.2. Potencia Activa vs Corriente

Tabla 5.6 Errores y métricas de evolución de potencia activa vs corrientes.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Corriente 1	0,9018	9,1211	7,451
Corriente 2	0,7584	17,6326	14,8011
Corriente 3	0,9326	8,1454	6,3484
Promedio Corriente	0,8927	9,9789	8,504

Para Corriente 1, se registra un R² de 0,9018, lo que indica una excelente capacidad predictiva del modelo, explicando más del 90% de la variabilidad observada en los datos. Este alto coeficiente de determinación sugiere que el modelo ajusta muy bien a los datos de Corriente 1, capturando eficazmente la relación entre la corriente y la potencia activa. Sin embargo, al considerar los valores de RMSE y MAE, que son 9,1211 y 7,451 respectivamente, es importante contextualizar estos números dentro del rango operativo total de la corriente. Estas métricas sugieren que, aunque el modelo predice con alta fiabilidad, todavía existen desviaciones promedio y errores cuadráticos entre las predicciones y los valores reales que podrían ser objeto de mejora.

En el caso de Corriente 2, el R² disminuye a 0,7584, lo que refleja una capacidad predictiva buena pero menor en comparación con la Corriente 1. Este descenso en el coeficiente de determinación podría indicar una relación ligeramente menos directa entre la potencia activa y la corriente en esta fase. El aumento significativo en los valores de RMSE y MAE a 17,6326 y 14,8011, respectivamente, destaca una mayor discrepancia entre las predicciones del modelo y las observaciones reales, lo cual puede ser indicativo de factores adicionales que afectan la corriente que no están completamente capturados por el modelo.

Corriente 3 muestra una mejora en la capacidad predictiva con un R^2 de 0,9326, superando incluso a la Corriente 1 y sugiriendo que el modelo se ajusta excepcionalmente bien a los datos de esta línea. Los errores, con un RMSE de 8,1454 y un MAE de 6,3484, son relativamente bajos, indicando predicciones precisas y consistentes con los valores observados, lo cual es un indicativo positivo de la eficacia del modelo para esta fase del sistema.

Al observar el Promedio de Corriente, se nota un R^2 de 0,8927, lo que refleja una alta capacidad general del modelo para explicar la variabilidad en las mediciones de corriente promedio en el sistema. Los valores de RMSE y MAE para el promedio son 9,9789 y 8,504, respectivamente, lo cual, aunque indica una buena precisión en general, también sugiere la posibilidad de refinar aún más el modelo para reducir estos errores.

5.1.5.3. Potencia Reactiva vs Voltaje

Tabla 5.7. Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs voltaje.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R^2)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Voltaje 1	0,4449	1,0375	0,8276
Voltaje 2	0,3849	0,9924	0,7913
Voltaje 3	0,358	1,0392	0,827
Voltaje Promedio	0,4027	1,01	0,8064

En este caso, los valores de R^2 obtenidos para los voltajes (Voltaje 1: 0,4449; Voltaje 2: 0,3849; Voltaje 3: 0,3580; Promedio Voltaje: 0,4027) sugieren que el modelo tiene una capacidad predictiva moderada, pero aún queda margen para mejorar la precisión del ajuste.

Para el error medio cuadrático (RMSE), debe evaluarse en el contexto de los rangos de valores de las variables de interés. Un RMSE bajo en comparación con el rango de la variable dependiente puede ser indicativo de un buen ajuste. Para sistemas de bombeo, donde los voltajes y corrientes pueden variar significativamente, un RMSE pequeño en comparación con estos rangos indica un modelo más preciso. Los valores de RMSE obtenidos (Voltaje 1: 1,0375; Voltaje 2: 0,9924; Voltaje 3: 1,0392; Promedio Voltaje: 1,0100) reflejan una precisión moderada en las predicciones del modelo, pero también indican que existen desafíos en la captura de la variabilidad total de los datos.

Para el error medio absoluto (MAE), al igual que con el RMSE, el MAE debe ser bajo en relación con el rango de la variable de interés para ser considerado aceptable. Un MAE menor indica que, en promedio, las predicciones del modelo tienen una desviación menor de los valores reales. El MAE es menos sensible a los valores atípicos que el RMSE, por lo que un MAE relativamente bajo puede ser preferible en situaciones donde los valores atípicos son una preocupación. Los valores de MAE obtenidos (Voltaje 1: 0,8276; Voltaje 2: 0,7913; Voltaje 3: 0,8270; Promedio Voltaje: 0,8064) indican que, en promedio, las predicciones del modelo tienen una desviación moderada de los valores reales, pero aún hay margen para mejorar la precisión del ajuste.

5.1.5.4. Potencia Reactiva vs Corriente

Tabla 5.8 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs corriente.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Corriente 1	0,5445	5,1795	4,0064
Corriente 2	0,6762	6,5089	5,1646
Corriente 3	0,3066	8,1564	6,7454
Promedio Corriente	0,6387	5,1283	4,0328

Para la corriente 1, R² de 0.5445 sugiere que el modelo explica el 54.45% de la variabilidad en los datos observados. Este valor, aunque por debajo del umbral del 0.70, indica una capacidad moderada del modelo para predecir la relación entre la potencia activa y la corriente en esta línea.

El RMSE de 5.1795 y el MAE de 4.0064 proporcionan medidas de error absoluto, con el RMSE indicando la raíz cuadrada promedio de las diferencias entre las predicciones y los valores observados.

Corriente 2, el R² de 0.6762 sugiere una mejora en la capacidad predictiva en comparación con la Corriente 1. Este valor indica que el modelo explica el 67.62% de la variabilidad en los datos, acercándose al umbral del 0.70. El RMSE de 6.5089 y el MAE de 5.1646 proporcionan métricas de error que indican la calidad del ajuste del modelo para esta corriente específica.

Corriente 3, un R² de 0.3066 indica que el modelo explica el 30.66% de la variabilidad en los datos observados para la Corriente 3. Este valor más bajo sugiere una capacidad predictiva

limitada en comparación con las otras corrientes. El RMSE de 8.1564 y el MAE de 6.7454, siendo los más altos entre las corrientes, indican mayores desviaciones entre las predicciones del modelo y los valores reales, lo que puede deberse a una mayor complejidad en la relación entre la potencia y la corriente en esta línea.

Promedio de Corriente, un R^2 de 0.6387 para el promedio sugiere una capacidad predictiva sólida en el conjunto de líneas. El RMSE de 5.1283 y el MAE de 4.0328 indican una precisión moderada en las predicciones del modelo para el conjunto de corrientes.

En términos generales, estos resultados sugieren que los modelos tienen un rendimiento variable según la corriente analizada. La Corriente 2 muestra la mejor capacidad predictiva, seguida por la Corriente 1 y el Promedio de Corriente, mientras que la Corriente 3 tiene un rendimiento más limitado. El análisis de estas métricas proporciona información valiosa sobre la calidad del ajuste de los modelos y señala posibles áreas de mejora, especialmente en la Corriente 3, donde la capacidad predictiva es más baja y los errores son más pronunciados.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO

En este estudio, se llevó a cabo la validación de un modelo matemático utilizando MATLAB, enfocándose en analizar el rendimiento de un sistema de bombeo ubicado en la localidad de El Chaupi. La validación del modelo se realizó mediante la comparación de sus predicciones con un conjunto de datos específicamente seleccionados, que reflejan las relaciones entre potencia activa, reactiva con relación al voltaje y corriente respectivamente. Estos datos fueron obtenidos para cumplir con los requerimientos necesarios para su incorporación en el código desarrollado en MATLAB, con el objetivo de evaluar la precisión y la adaptabilidad del modelo ante diferentes condiciones operativas. A continuación, se presenta el diagrama unifilar considerando el sistema de bombeo de la localidad en El Chaupi.

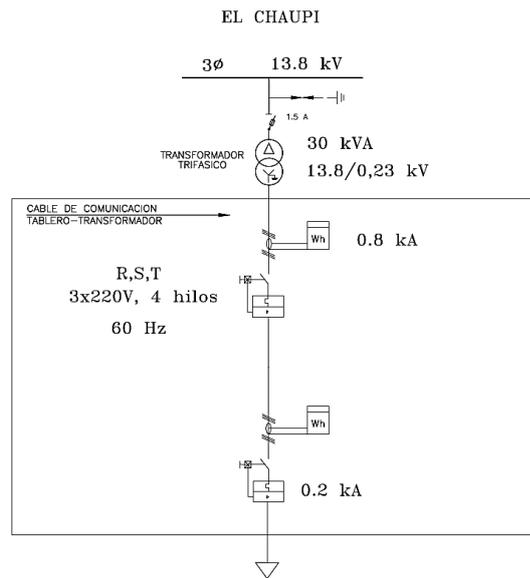


Figura 5.7 Diagrama unifilar correspondiente al sistema de bombeo de agua potable de la localidad.

5.2.1. Potencia Activa vs Voltaje

Los coeficientes obtenidos reflejan cómo se comporta la potencia activa en respuesta a cambios de voltaje en cada una de las líneas del sistema trifásico y su promedio, véase Anexo K.

Tabla 5.9 Coeficientes de regresión polinomial para potencia activa vs voltaje.

Evaluación	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Voltaje 1	-3,1E-09	0,000435	117,624985
Voltaje 2	-0,000000003	0,000416	119,709601
Voltaje 3	-3,1E-09	0,00044	117,653831
Promedio Voltaje	-3,1E-09	0,00043	118,329472

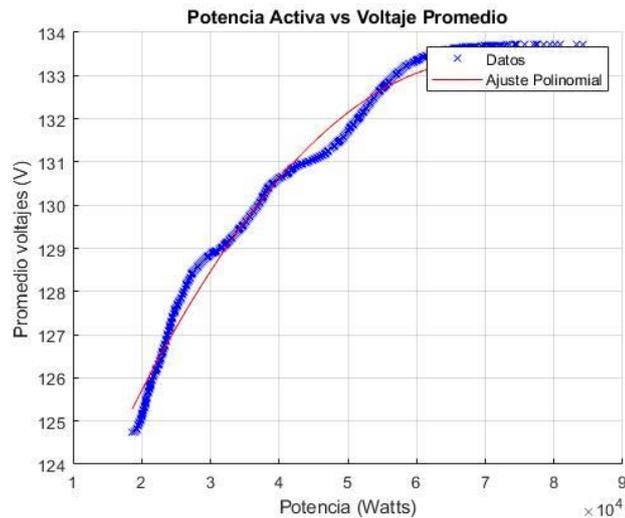


Figura 5.8 Curva de potencia activa vs promedio de voltajes, ajuste polinómico.

Para el Voltaje 1, el coeficiente cuadrático (a) es de $-3.1E-09$, lo que indica que hay un efecto cuadrático muy pequeño y negativo sobre la potencia activa conforme el voltaje aumenta. El coeficiente lineal (b) de 0.000435 sugiere que hay una relación positiva entre el voltaje y la potencia activa; es decir, a medida que el voltaje aumenta, la potencia activa también tiende a aumentar. El término independiente (c) de 117.624985 puede interpretarse como la potencia activa teórica cuando el voltaje es cero.

Para el Voltaje 2, el coeficiente cuadrático es idéntico al de Voltaje 1, mostrado como -0.000000003 , lo cual es simplemente otra forma de representar $-3.1E-09$. Esto refuerza la idea de que el efecto cuadrático negativo es consistente a través de diferentes evaluaciones. El coeficiente lineal es ligeramente menor, con un valor de 0.000416 , indicando una relación ligeramente menos pronunciada entre el voltaje y la potencia activa comparado con el Voltaje 1. El término independiente es mayor, con un valor de 119.709601 , sugiriendo una potencia activa base más alta en el punto de partida cuando el voltaje es cero.

Para el Voltaje 3, se observa nuevamente el mismo coeficiente cuadrático negativo ($-3.1E-09$), manteniendo la consistencia en el efecto cuadrático a través de las evaluaciones. El coeficiente lineal es el más alto entre las tres evaluaciones, con un valor de 0.00044 , indicando la relación más fuerte entre el voltaje y la potencia activa en este caso. El término independiente

es de 117.653831, casi idéntico al del Voltaje 1, lo que sugiere condiciones similares de partida para estos dos voltajes.

Al considerar el Promedio de Voltaje, el coeficiente cuadrático sigue siendo $-3.1E-09$, lo que confirma que, en promedio, el modelo sugiere una ligera disminución en la potencia activa a medida que el voltaje cuadra su valor, aunque este efecto es extremadamente pequeño. El coeficiente lineal promedio es de 0.00043, lo cual es consistente con los coeficientes lineales individuales y apunta a una relación lineal positiva general entre el voltaje y la potencia activa. El término independiente promedio de 118.329472 refleja la potencia activa promedio a un voltaje de cero, proporcionando un punto de referencia estándar para las diferentes evaluaciones.

5.2.2. Potencia Activa vs Corriente

Al igual que con el voltaje, se utilizó un modelo polinómico de segundo grado para estimar la relación entre la potencia activa y la corriente en cada motor y en el promedio del sistema, véase Anexo K.

Tabla 5.10 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia activa vs corriente.

Evaluación	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Corriente 1	-0,00000007	0,009139	-87,246482
Corriente 2	-0,00000007	0,009215	-81,184946
Corriente 3	-0,00000007	0,009177	-90,215714
Promedio Corriente	-0,00000007	0,009177	-86,215714

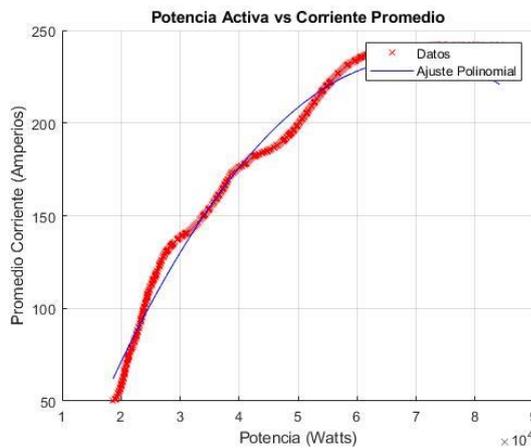


Figura 5.9 Curva de potencia activa vs promedio de corrientes, ajuste polinómico.

En la primera evaluación, correspondiente a la Corriente 1, el modelo identificó un coeficiente cuadrático de -0.00000007 . A pesar de su tamaño insignificante, este valor indica una ligera tendencia cuadrática inversa en la relación, que en la práctica es casi imperceptible y la relación se mantiene predominantemente lineal. El coeficiente lineal de 0.009139 señala que la potencia activa aumenta en respuesta a la corriente, un comportamiento esperado en sistemas eléctricos estándar. El término independiente de -87.246482 , aunque teóricamente inusual, se atribuye a ajustes en el modelo o desviaciones en la calibración.

La segunda evaluación, para la Corriente 2, mantuvo el mismo coeficiente cuadrático mientras que el coeficiente lineal aumentó ligeramente a 0.009215 . Este incremento refleja una sensibilidad marginalmente mayor de la potencia activa a cambios en la corriente. El término independiente mostró una mejora al registrar un valor de -81.184946 , lo que sugiere una discrepancia menos pronunciada en el punto de cero corrientes en comparación con la Corriente 1.

En la tercera evaluación, la constante del coeficiente cuadrático permaneció mientras que el coeficiente lineal registró un valor intermedio de 0.009177 , corroborando la consistencia en la relación lineal observada en las otras dos corrientes. Sin embargo, el término independiente cayó a -90.215714 , siendo el más negativo de los tres y resaltando una mayor desviación inicial en la relación potencia reactiva-corriente.

El promedio de los coeficientes para las tres corrientes refleja la tendencia general del sistema, con un coeficiente cuadrático constante y un coeficiente lineal promedio de 0.009177 . Este último representa una relación lineal sólida y confiable entre la potencia activa y la corriente a través de las distintas evaluaciones. El término independiente promedio de -86.215714 , aunque negativo, sirve como un punto de referencia para el comportamiento promedio del sistema en condiciones de corriente nula.

5.2.3. Potencia Reactiva vs Voltaje

Los coeficientes obtenidos reflejan cómo se comporta la potencia reactiva en respuesta a cambios de voltaje en cada una de las líneas del sistema trifásico y su promedio, véase Anexo L.

Tabla 5.11 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de voltajes.

Evaluación	Coefficiente cuadrático (a)	Coefficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Voltaje 1	-1,29E-08	0,000702	123,971693
Voltaje 2	-1,24E-08	0,000671	125,777333
Voltaje 3	-1,31E-08	0,00071	124,070283
Promedio Voltaje	-1,28E-08	0,000694	124,606436

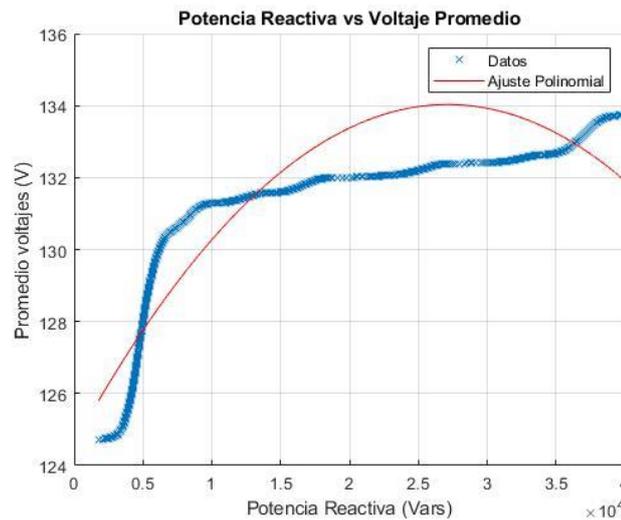


Figura 5.10 Curva de potencia reactiva vs voltaje promedio, ajuste polinómico.

Para el Voltaje 1, el coeficiente cuadrático obtenido fue de $-1.29E-08$. Este valor, aunque pequeño, indica una ligera curvatura en la gráfica de la potencia reactiva frente al voltaje. El coeficiente lineal fue de 0.000702 , lo que sugiere que existe una correlación directa y más fuerte entre el incremento del voltaje y el aumento de la potencia reactiva en comparación con los otros voltajes evaluados. El término independiente se determinó en 123.971693 , lo cual podría interpretarse como la potencia reactiva estimada cuando el voltaje es cero.

Mientras que para el Voltaje 2, el coeficiente cuadrático se registró ligeramente menor, en $-1.24E-08$. El coeficiente lineal, de 0.000671 , muestra una relación positiva entre voltaje y potencia reactiva, aunque con una pendiente menos pronunciada que en el Voltaje 1. Esto podría indicar una menor sensibilidad de la potencia reactiva a los cambios de voltaje en esta evaluación. El término independiente fue de 125.777333 , el más alto de los tres, lo que sugiere una base de potencia reactiva más elevada.

En la evaluación del Voltaje 3, se encontró un coeficiente cuadrático de $-1.31E-08$, muy similar a los otros voltajes, lo que indica una consistencia en el efecto cuadrático negativo a través de las evaluaciones. El coeficiente lineal fue de 0.00071 , indicando una leve tendencia a una mayor potencia reactiva con el aumento de voltaje en comparación con el Voltaje 2. El término independiente calculado fue de 124.070283 , situándose entre los valores de las otras dos evaluaciones.

El análisis del promedio de voltajes reveló un coeficiente cuadrático promedio de $-1.28E-08$, que mantiene la misma tendencia leve y negativa de las evaluaciones individuales. El coeficiente lineal promedio fue de 0.000694 , reflejando una relación directa entre el voltaje y la potencia reactiva que es representativa de las tres evaluaciones. El término independiente promedio de 124.606436 sirve como una estimación centralizada de la potencia reactiva a un voltaje de cero, basado en el promedio de los datos analizados.

5.2.4. Potencia Reactiva vs Corriente

Al igual que con el voltaje, se utilizó un modelo polinómico de segundo grado para estimar la relación entre la potencia activa y la corriente en cada motor y en el promedio del sistema, véase Anexo L.

Tabla 5.12 Coeficientes de regresión polinomial para la potencia reactiva vs promedio de corriente.

Evaluación	Coeficiente cuadrático (a)	Coeficiente lineal (b)	Término independiente (c)
Corriente 1	-0,00000027	0,01475	46,10414
Corriente 2	-0,00000027	0,0149	53,2816
Corriente 3	-0,00000027	0,0148	43,6929
Promedio Corriente	-0,00000027	0,01482	47,69286

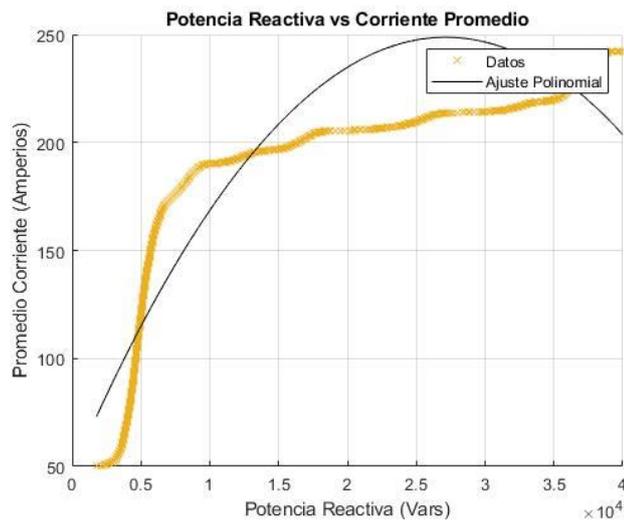


Figura 5.11 Curva de potencia reactiva vs promedio de corriente, ajuste polinómico.

Corriente 1: El análisis arrojó un coeficiente cuadrático de -0.00000027 , lo que implica una ligera tendencia parabólica en la relación entre la corriente y la potencia reactiva, aunque el valor pequeño sugiere que la curvatura de la relación es leve. El coeficiente lineal se determinó en 0.01475 , indicando una relación directa entre el aumento de corriente y el incremento en la potencia reactiva. El término independiente, siendo 46.10414 , representa la potencia reactiva teórica cuando la corriente es cero.

Corriente 2: Se encontró el mismo coeficiente cuadrático de -0.00000027 , manteniendo la coherencia con la Corriente 1. Sin embargo, el coeficiente lineal aumentó ligeramente a 0.0149 , reflejando una sensibilidad un poco más elevada de la potencia reactiva ante cambios en la corriente. El término independiente ascendió a 53.2816 , el más alto entre las tres evaluaciones, lo que podría indicar una base de referencia más alta para la potencia reactiva en ausencia de corriente.

Corriente 3: La tercera medición también compartió el coeficiente cuadrático de -0.00000027 , evidenciando una consistencia en el patrón cuadrático entre las mediciones. El coeficiente lineal fue de 0.0148 , ubicándose entre los valores de Corriente 1 y Corriente 2, lo cual sugiere una relación casi uniforme con las mediciones anteriores. El término independiente fue de 43.6929 , el más bajo de las tres mediciones, lo que denota una base más baja de potencia reactiva para un nivel de corriente nulo.

Promedio de Corriente: Los valores promedio reflejan las tendencias observadas en las mediciones individuales. El coeficiente cuadrático promedio se mantuvo constante en -0.00000027, reafirmando la presencia de una curva leve en la relación global. El coeficiente lineal promedio de 0.01482 representa la relación general entre la corriente y la potencia reactiva en el sistema, señalando una correlación directa y estable. El término independiente promedio de 47.69286 proporciona un punto de referencia promedio para la potencia reactiva en ausencia de corriente.

5.2.5. Errores y Métricas de Evaluación

5.2.5.1. Potencia Activa vs Voltaje

Tabla 5.13 Errores y métricas de evaluación de potencia activa vs voltajes.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Voltaje 1	0,9822	0,3506	0,2838
Voltaje 2	0,9452	0,3352	0,2713
Voltaje 3	0,9252	0,3544	0,2869
Promedio Voltaje	0,9662	0,3467	0,2807

Los resultados de la evaluación muestran un rendimiento excepcional del modelo de regresión en la predicción de la potencia activa en relación con los voltajes. En primer lugar, los coeficientes de determinación (R²) son notoriamente altos para cada voltaje evaluado, así como para el promedio de voltaje. Un coeficiente de determinación cercano a 1 indica un ajuste muy bueno del modelo a los datos. En este caso, los valores de R² son 0.9822 para Voltaje 1, 0.9452 para Voltaje 2, 0.9252 para Voltaje 3 y un promedio de 0.9662, lo que sugiere que el modelo explica una gran parte de la variabilidad en la potencia activa a partir de los voltajes, lo cual es un indicador positivo de la calidad del ajuste del modelo.

Además, los errores cuadráticos medios (RMSE) proporcionan una medida de la dispersión de los errores en las predicciones del modelo. Los valores de RMSE son notablemente bajos para cada voltaje individual y para el promedio de voltaje, lo que sugiere una precisión generalizada del modelo en sus predicciones. Para Voltaje 1, el RMSE es de 0.3506, para Voltaje 2 es de 0.3352 y para Voltaje 3 es de 0.3544, con un promedio de 0.3467. Un RMSE

bajo indica que las predicciones del modelo tienden a estar cerca de los valores reales, lo cual es un indicador positivo de la precisión del modelo.

Por último, los errores absolutos medios (MAE) dan una idea adicional sobre la precisión del modelo al medir las diferencias absolutas entre las predicciones del modelo y los valores reales. Nuevamente, se observa una consistencia en la precisión, con valores bajos tanto para los voltajes individuales como para el promedio de voltaje. Los valores de MAE son de 0.2838 para Voltaje 1, 0.2713 para Voltaje 2, 0.2869 para Voltaje 3 y un promedio de 0.2807. Un MAE bajo indica que las predicciones del modelo tienden a desviarse poco de los valores reales, lo cual es otro indicador positivo de la precisión del modelo.

5.2.5.2. Potencia Activa vs Corriente

Tabla 5.14 Errores y métricas de evolución de potencia activa. vs corrientes.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Corriente 1	0,9592	7,366	5,9625
Corriente 2	0,9822	7,4277	6,0124
Corriente 3	0,9332	7,3969	5,9875
Promedio Corriente	0,9692	7,4859	6,0765

La evaluación revela que el modelo de regresión mantiene una consistencia en la predicción de la potencia activa según las corrientes. Los coeficientes de determinación (R²) son notables para cada corriente individual y el promedio, lo que sugiere una adecuada capacidad del modelo para explicar la variabilidad en la potencia activa. Por ejemplo, el R² es de 0.9592 para la Corriente 1, 0.9822 para la Corriente 2 y 0.9332 para la Corriente 3, con un promedio de 0.9692.

En cuanto a los errores cuadráticos medios (RMSE), aunque son más altos que los observados en el análisis de voltajes, siguen siendo relativamente bajos en términos absolutos. Esto implica que, aunque hay una dispersión en las predicciones, el modelo tiende a aproximarse adecuadamente a los valores reales. Por ejemplo, los valores de RMSE son de 7.366 para Corriente 1, 7.4277 para Corriente 2 y 7.3969 para Corriente 3, con un promedio de 7.4859.

Los errores absolutos medios (MAE) también proporcionan información sobre la precisión del modelo, mostrando las diferencias absolutas entre las predicciones y los valores reales. Aunque los valores de MAE son mayores que en el análisis de voltajes, siguen siendo moderados en términos absolutos, lo que indica una precisión razonable del modelo. Por ejemplo, los valores de MAE son de 5.9625 para Corriente 1, 6.0124 para Corriente 2 y 5.9875 para Corriente 3, con un promedio de 6.0765.

5.2.5.3. Potencia Reactiva vs Voltaje

Tabla 5.15 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs voltaje.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Voltaje 1	0,8443	1,1589	1,0196
Voltaje 2	0,8053	1,108	0,9748
Voltaje 3	0,8613	1,1717	1,0308
Voltaje Promedio	0,8383	1,1462	1,0084

Los coeficientes de determinación (R²) muestran que los voltajes tienen una capacidad moderada para explicar la variabilidad en la potencia reactiva. Los valores de R² oscilan entre 0.8053 y 0.8613 para los voltajes individuales, con un promedio de 0.8383. Aunque estos valores indican que el modelo puede capturar una parte significativa de la variabilidad en la potencia reactiva, también sugieren que existe una variabilidad residual no explicada por los voltajes.

Los errores cuadráticos medios (RMSE) son relativamente bajos, lo que sugiere que las predicciones del modelo tienden a estar cerca de los valores reales en términos absolutos. Sin embargo, los valores de RMSE oscilan entre 1.108 y 1.1717 para los voltajes individuales, con un promedio de 1.1462. Esta dispersión en las predicciones indica que puede haber margen para mejorar la precisión del modelo, especialmente considerando los límites impuestos por estos valores de RMSE.

Por último, los errores absolutos medios (MAE) también son relativamente bajos, pero indican cierta dispersión en las predicciones del modelo. Los valores de MAE oscilan entre 0.9748 y 1.0308 para los voltajes individuales, con un promedio de 1.0084. Con un MAE

promedio de 1.0084, es posible que las predicciones del modelo se desvíen moderadamente de los valores reales, lo que sugiere una cierta limitación en la precisión del modelo.

5.2.5.4. Potencia Reactiva vs Corriente

Tabla 5.16 Errores y métricas de evolución de potencia reactiva vs corriente.

Evaluación	Coefficiente de determinación (R²)	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
Corriente 1	0,8623	24,3502	21,4233
Corriente 2	0,8473	24,554	21,6026
Corriente 3	0,8223	24,4521	21,5129
Promedio Corriente	0,8833	24,4831	21,5419

Los coeficientes de determinación (R²) evidencian la influencia de la corriente en la variabilidad de la potencia reactiva. Se observan valores de R² de 0.8623 para Corriente 1, 0.8473 para Corriente 2, 0.8223 para Corriente 3, y un promedio general de 0.8833. Estos números reflejan una relación notable entre la corriente y la potencia reactiva, lo cual es alentador.

En contraste, los errores cuadráticos medios (RMSE) señalan discrepancias considerables entre las predicciones del modelo y los valores reales. Con valores que oscilan entre 24.3502 y 24.554 para las diferentes corrientes, y un promedio de 24.4831, esta dispersión sugiere una precisión limitada en las predicciones, lo cual podría considerarse desfavorable.

Del mismo modo, los errores absolutos medios (MAE) muestran desviaciones notables entre las predicciones y los valores reales, aunque en un grado ligeramente menor que el RMSE. Los valores de MAE varían entre 21.4233 y 21.6026 para las diferentes corrientes, con un promedio de 21.5419, lo que indica una precisión moderada pero no óptima en las predicciones.

5.3. COSTOS DEL PROYECTO

En la siguiente tabla se muestran los elementos empleados, se incluyen los artículos necesarios para la implementación. En este apartado se omite el costo del internet debido a que se utiliza la conexión a ethernet de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Tabla 5.17. Costos del sistema de medición.

Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Gabinete 60x40x20 mm	u	1	54,91	54,91
EKM-omnimeter pulse v.4	u	1	325,67	325,67
Transformadores de corriente sct-032-400 UL	u	3	84,75	254,25
Portafusibles cilíndrico RT18-32 (x) 10 mm x 38 mm	u	4	4,7	18,8
Fusible ro15 1 a	u	4	2,02	8,08
Cable 14 AWG	m	9	0,29	2,61
Cable 18 AWG	m	9	0,26	2,34
Cable UTP CAT 6	m	1	0,75	0,75
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Manguera funda sellada 3/4	u	1	2,89	2,89
Conector funda sellada 3/4	u	2	1,09	2,18
Funda termo-retráctil 8 mm	m	9	0,27	2,43
Terminales rj45	u	2	0,25	0,5
Borneras 6x43 mm	u	24	1,39	33,36
Separadores de borneras	u	2	1,42	2,84
Riel din	m	1	1,43	1,43
Canaleta ranurada	m	2	1,26	2,52
Herramientas y consumibles	u	1	50	50
Total				765,56

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Finalmente, el presente proyecto efectúa la medición en tiempo real de características propias de máquinas de inducción mismas que son parte del grupo de bombas de agua sanitaria y otras cargas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en donde se verifica que el modelo polinomial de segundo grado no muestra ser útil al momento de contrastar la medición de potencia activa-voltaje/corriente y potencia reactiva-voltaje/corriente.
- El modelo polinomial para modelamiento de carga con enfoque a máquinas de inducción fue la forma adecuada de verificar el comportamiento cuando existen variaciones en tensión, frecuencia y potencias, teniendo en cuenta que, los datos obtenidos por el sistema de medición pasaron por técnicas correlación de datos, validación de no-negatividad y filtro de valores negativos para ser aptos a la obtención de coeficientes.
- El sistema de medición inteligente EKM instalado en el cuarto de máquinas, muestra ser útil al momento de dar lectura y almacenar datos correspondientes a las barras que alimentan la sala de bombas de agua sanitaria evidenciando un error de 0.1 %, los valores de tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva y frecuencia se verifican en la nube EKM.
- En consecuencia, este estudio se centró en analizar la relación entre la potencia activa y reactiva con las mediciones de voltaje y corriente en el sistema de bombeo, el cual se enfrentó a desafíos y limitaciones al utilizar datos generales en vez de mediciones detalladas y específicas, sin embargo, las variaciones naturales de la energía, junto con el funcionamiento intermitente de las bombas, introdujo incertidumbre en los resultados, lo cual se evidenció en las anomalías detectadas en las partes específicas del análisis matemático. Aunque el método utilizado ha proporcionado una comprensión básica del funcionamiento del sistema, su habilidad para representar con precisión cómo opera cada bomba por separado es restringida.
- Por lo tanto, la naturaleza de las mediciones tomadas en primer lugar, y las interacciones dinámicas resultantes del banco de condensadores y de los ciclos de encendido y

apagado de las bombas, han llevado a un modelo que podría no ser tan representativo con respecto a las condiciones de voltajes y corrientes individuales.

- Además, el análisis de los resultados obtenidos revela un desempeño prometedor del modelo polinomial de segundo grado, el cual se empleó para examinar el comportamiento de la potencia activa y reactiva en relación con los voltajes y corrientes de cada línea del sistema eléctrico. Los coeficientes de determinación (R^2) destacan una relación significativa lo que sugiere que el modelo propuesto demuestra ser efectivo en el contexto del sistema de bombeo original.
- Sin embargo, para garantizar la validez y la aplicabilidad del modelo, fue esencial llevar a cabo una validación externa utilizando datos independientes de un sistema de bombeo diferente. La selección del sistema de bombeo de El Chaupi como referencia para esta validación ofreció una oportunidad crítica para evaluar la generalización del modelo más allá del sistema originalmente analizado.
- Finalmente, la realización de un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el sistema original y los datos recopilados del sistema de El Chaupi fue fundamental para confirmar la efectividad del modelo polinomial de segundo grado propuesto. Este análisis comparativo permitió una evaluación de la capacidad del modelo en diferentes condiciones operativas, lo que respaldará su utilidad y relevancia en la práctica de diseño y operación de sistemas de bombeo.

6.2. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos relacionados al modelamiento de la sala de bombas en la Universidad Técnica de Cotopaxi se recomienda prolongar el tiempo de funcionamiento de las bombas para evitar analizar los picos de corriente y caída de tensión propias de las máquinas de inducción al momento del arranque.
- Incrementar la granularidad de las mediciones mediante el uso de sensores individuales en cada bomba para capturar con mayor precisión las condiciones operativas específicas.
- Explorar la inclusión de variables adicionales en el modelo, como el voltaje y la corriente individuales de cada bomba, para mejorar la representatividad y precisión del modelo.

- Considerar el desarrollo de modelos adaptativos que puedan ajustarse a las variaciones dinámicas del sistema, como los patrones de encendido y apagado de las bombas, para una representación más fidedigna del comportamiento del sistema.
- Para el desarrollo del presente estudio se optó por el modelo polinomial de carga, pero se puede optar por el modelo de carga ZIP debido a que analiza características propias de las máquinas de inducción.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. MORALES OSORIO y R. RUBIO GUTIÉRREZ, «Repositorio de la Universidad de Chile,» Septiembre 2013. [En línea]. Available: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114820/cf-quezada_ml.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 18 Diciembre 2023].
- [2] J. R. Caiza Quiroz, «Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional,» 24 Enero 2017. [En línea]. Available: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114820/cf-quezada_ml.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 18 Diciembre 2023].
- [3] IEEE Standards Association, «IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems,» The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, Nueva York, 2022.
- [4] S. Pérez, L. Rodríguez y J. Mora, «Tecnura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas,» 19 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257036222014>. [Último acceso: 18 Diciembre 2023].
- [5] J. Constante y G. Colomé, «CENACE,» 1 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/475>. [Último acceso: 18 Enero 2023].
- [6] J. Carmona, «Modelos de motores de inducción para estudios estáticos de sistemas de potencia,» *Instituto Politécnico Nacional*, vol. 1, n° 1, pp. 20-29, 2010.
- [7] S. Gonzáles, «Repositorio de la Universidad Politécnica de Madrid,» 23 Julio 2018. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/52757/1/TFG_SABELA_GONZALEZ_CASTRO.pdf. [Último acceso: 18 Diciembre 2023].
- [8] L. Rodríguez, S. Pérez y J. Mora, «Scientia Et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira,» Octubre 2013. [En línea]. Available:

- <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84929154004>. [Último acceso: 18 Diciembre 2023].
- [9] S. Cardona, «Repositorio de la Universidad Tecnológico de Pereira,» 20 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/10ecb118-b7e3-44d9-a3f2-5e43921e9e47/content>. [Último acceso: 18 Enero 2023].
- [10] C. Pizango, «PDFCOFFE SENANTI,» 21 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://pdfcoffee.com/dibujo-tecnico-para-electrotecnia-pdf-free.html>. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [11] A. Cafaggi, E. Rodal y A. Sánchez, «Repositorio de la Universidad Autónoma de México,» Julio 2021. [En línea]. Available: [https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/Sistemas%20de%20bombeo%20\(dig-2021\)%201.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/Sistemas%20de%20bombeo%20(dig-2021)%201.pdf). [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [12] G. Graling, «Repositorio UDLAP Catarina,» 30 Noviembre 2004. [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/capitulo1.pdf. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [13] B. Parámo, «BIBLUS,» 15 Marzo 2011. [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4842/fichero/memoria%252F2.+Motor+de+inducci%C3%B3n.pdf>. [Último acceso: 17 Diciembre 2023].
- [14] K. Vásquez, «Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina,» 17 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5539/vasquez-escobar-katherin-samantha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 5 Diciembre 2023].
- [15] H. Sulbarán, «ACADEMIA.EDU,» Marzo 2021. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/80750808/TESIS_MODELACI%C3%93N_DE_SISTEMA_EL%C3%89CTRICO_DE_POTENCIA_MEDIANTE_SOFTWARE_DE_INGENIER%C3%8DA_EL%C3%89CTRICA. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].

- [16] D. Samaniego y O. Valesaca, «Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana,» Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12893/1/UPS-CT006717.pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [17] D. Heredia, «Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira,» Abril 2013. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/reader/71397220>. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [18] A. Rosado, «Repositorio de la Universidad de Valencia,» 11 Marzo 2003. [En línea]. Available: https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf. [Último acceso: 16 Diciembre 2023].
- [19] R. Herrera Orozco, J. Mora Flores y F. Patiño , «Simulación y validación del modelo polinomial de carga utilizando ATP,» *Universidad Tecnológica de Pereira*, vol. 18, p. 8, 2013.
- [20] J. Caiza, «Determinacion Experimental de las Caracteristicas de los modelos de carga de los artefactos electricos modernos de uso residencial,» Enero 2017. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17015/1/CD-7596.pdf>. [Último acceso: 21 Enero 2024].
- [21] Smart Buildings, Loads, and Customer Systems Committee of the IEEE Power and Energy Society, «IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems,» STANDARDS, New York, 2022.
- [22] EKM Metering INC, «EKM,» [En línea]. Available: <https://documents.ekmmetering.com/EKM-Omnimeter-Pulse-v.4-Spec-Sheet.pdf#zoom=100>. [Último acceso: 25 01 2024].
- [23] EKM Support Desk, «EKM,» [En línea]. Available: <https://help.ekmmetering.com/support/solutions/articles/6000058103-rs485-wiring-how-to-best-practices>. [Último acceso: 20 01 2024].

- [24] EKM Metering INC., [En línea]. Available: <https://documents.ekmmetering.com/EKM-SCT-032-400-CT-spec-sheet.pdf>. [Último acceso: 20 01 2024].
- [25] H. Jaramillo, «Operación de Subestaciones de energía,» SENA, Medellín, 1987.
- [26] B. G. S. Cáneppa, «Follero Técnico de fusibles,» 2022. [En línea]. Available: <https://web.instipp.edu.ec/Libreria/libro/FOLLETO%20FUSIBLES.pdf>. [Último acceso: 25 01 2024].
- [27] E. Blanco, S. Velarde y J. Fernández, «Repositorio de la Universidad de Oviedo,» 27 Abril 1994. [En línea]. Available: https://agascablog.wpcomstaging.com/wp-content/uploads/2018/08/PDF_SistemasdeBombeo2.pdf. [Último acceso: Diciembre 16 2023].
- [28] J.D. LTDA, «Suministros de materiales electricos,» [En línea]. Available: <https://jdelectricos.com.co/tableros-electricos/>. [Último acceso: 20 01 2024].
- [29] Amazon, [En línea]. Available: <https://www.amazon.com.mx/Baomain-RT18-32-cilindrico-fusibles-certificado/dp/B086MQWPJP?th=1>. [Último acceso: 20 01 2024].
- [30] MGI Soluciones en ingeniería eléctrica, «Catálogo de borneras,» [En línea]. Available: https://www.mgi.com.uy/images/pdf/connect-well-baja-tension/catalogo_connectwell.pdf. [Último acceso: 20 01 2024].
- [31] Norma Ecuatoriana de la Construcción, «Instalaciones Electricas,» Quito, 2018.

ANEXOS

ANEXO A	INFORME ANTIPLAGIO	
---------	--------------------	--

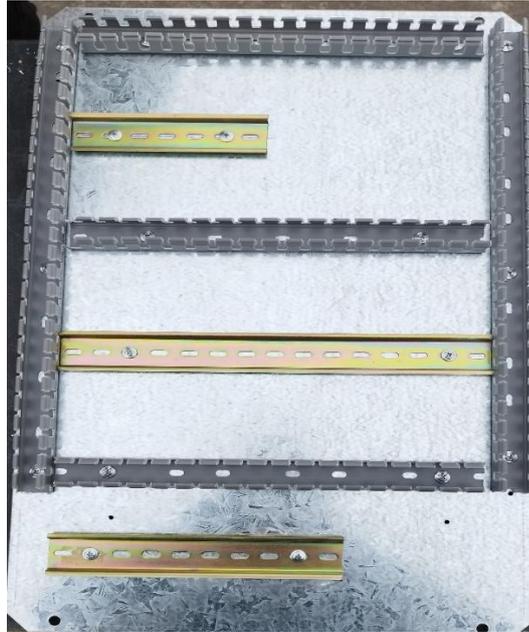
Facultad:	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas
Carrera:	Ingeniería en Electricidad
Nombre del docente evaluador que emite el informe:	
Documento evaluado:	
Programa de similitud utilizado:	
Porcentaje de similitud según el programa utilizado	
Observaciones: Calificación de originalidad atendiendo a los siguientes criterios: <ul style="list-style-type: none"> El documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones. El documento cumple criterios de originalidad, con observaciones. El documento no cumple con criterios de originalidad. 	-X- --- ---
Fecha de realización del informe:	26/02/2024
Captura de pantalla del documento analizado:	
	
 Ing. M.Sc. Luis Rolando Cruz Panchi C.C: 050259517-6 TUTOR	

ANEXO B		RESISTENCIAS DE CONDUCTORES DE COBRE							
Designación del conductor		Resistencia eléctrica en ohms/km							
Calibre AWG o kcmil	Área de la sección transversal mm ²	Corriente directa				Corriente alterna (60 Hz)*			
		20 °C	60 °C	75 °C	90 °C	20 °C	60 °C	75 °C	90 °C
20	0,519	33,88	38,98	41,21	43,21	33,88	38,98	41,21	43,21
18	0,824	21,35	24,57	25,98	27,24	21,35	24,57	25,98	27,24
16	1,31	13,46	15,48	16,37	17,16	13,46	15,48	16,37	17,16
14	2,08	8,447	9,720	10,27	10,77	8,447	9,72	10,27	10,77
12	3,31	5,318	6,119	6,469	6,783	5,318	6,119	6,469	6,783
10	5,26	3,343	3,847	4,067	4,264	3,343	3,847	4,067	4,264
8	8,37	2,102	2,419	2,557	2,681	2,102	2,419	2,557	2,681
6	13,3	1,322	1,522	1,609	1,687	1,322	1,522	1,609	1,687
4	21,2	0,831 5	0,956 8	1,011	1,060	0,831 6	0,956 9	1,011	1,060
2	33,6	0,523 1	0,601 9	0,636 3	0,667 2	0,523 3	0,602 1	0,636 5	0,667 4
--	35,0	0,502 5	0,578 2	0,611 3	0,640 9	0,502 7	0,578 4	0,611 5	0,641 1
--	50,0	0,351 7	0,404 7	0,427 9	0,448 6	0,352 1	0,405 0	0,428 2	0,448 9
1/0	53,5	0,328 8	0,378 4	0,400 0	0,419 4	0,329 2	0,378 7	0,400 3	0,419 7
2/0	67,4	0,260 8	0,300 1	0,317 3	0,332 7	0,261 3	0,300 5	0,317 7	0,333 0
--	70,0	0,251 2	0,289 1	0,305 6	0,320 4	0,251 7	0,289 5	0,306 0	0,320 8
3/0	85,0	0,206 9	0,238 1	0,251 7	0,263 9	0,207 4	0,238 6	0,252 1	0,264 3
4/0	107	0,164 0	0,188 8	0,199 6	0,209 2	0,164 8	0,189 4	0,200 2	0,209 8
250	127	0,138 8	0,159 7	0,168 9	0,177 0	0,139 7	0,160 5	0,169 6	0,177 7
--	150	0,117 2	0,134 9	0,142 6	0,149 5	0,118 3	0,135 8	0,143 5	0,150 3
300	152	0,115 7	0,133 1	0,140 7	0,147 6	0,116 7	0,134 0	0,141 6	0,148 4
350	177	0,099 20	0,114 1	0,120 7	0,126 5	0,100 4	0,115 2	0,121 7	0,127 5
400	203	0,086 76	0,099 84	0,105 54	0,110 66	0,088 15	0,101 05	0,106 70	0,111 76
--	240	0,073 27	0,084 32	0,089 14	0,093 46	0,074 93	0,085 76	0,090 51	0,094 77
500	253	0,069 40	0,079 86	0,084 43	0,088 52	0,071 14	0,081 39	0,085 87	0,089 90
600	304	0,057 85	0,066 57	0,070 37	0,073 79	0,059 94	0,068 40	0,072 11	0,075 45
750	380	0,046 28	0,053 25	0,056 30	0,059 03	0,048 87	0,055 54	0,058 47	0,061 10
1 000	507	0,034 71	0,039 94	0,042 22	0,044 27	0,038 09	0,042 95	0,045 09	0,047 02

ANEXO C		CARACTERÍSTICAS DEL MEDIDOR EKM	
Especificaciones técnicas			
Especificaciones técnicas	120 V a 415 V, 2 hilos, monofásico, una línea y neutro 120 V a 415 V, 2 hilos, monofásico, dos líneas vivas 120 V a 480 V, 3 hilos, monofásico, 2 líneas y neutro 120 V a 415 V, 3 cables, trifásico, 3 líneas, sin neutro 120V a 480V, 4 hilos, trifásico, 3 líneas y neutro		
Rango de condiciones ambientales permitidas	Grado de contaminación 2, Categoría de medición III, clasificación de altitud 2000 metros máx. Máximo Rango de temperatura: -30 grados. C a 70 grados. C.		

ANEXO F

SISTEMA DE MEDICIÓN AVANCES





ANEXO G	CÓDIGO EN MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES – POTENCIA ACTIVA	
<pre> % TEMA DE TESIS: % “Obtención del Modelo de Carga Polinomial para un Sistema de bombeo de % agua sanitaria a partir de mediciones experimentales” % CONIDERACIÓN POTENCIA ACTIVA TOTAL %% % Leer los datos desde un archivo de Excel filename = 'DatosPrueba.xlsx'; data = readtable(filename); % Convertir la columna de fecha y hora a tipo datetime % Reemplaza 'NombreColumnaFechaHora' con el nombre real de tu columna de fecha y hora data.FechaHora = datetime(data.Corregido, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm'); % Definir las fechas límites fechaInicio = datetime('04/08/2021 00:00', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm'); fechaFin = datetime('04/08/2021 23:59', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm'); % Filtrar las filas que caen dentro del rango de fechas filasEnRango = data.FechaHora >= fechaInicio & data.FechaHora <= fechaFin; % Aplicar el filtro a tus datos datosFiltrados = data(filasEnRango, :); % Extraer las columnas de potencia, voltaje y corriente de los datos filtrados % Asegúrate de reemplazar 'NombreColumnaPotencia', 'NombreColumnaVoltaje', y 'NombreColumnaCorriente' % con los nombres reales de tus columnas en el archivo Excel PotenciasActivas = datosFiltrados.TotalPower_Watts_; voltajes1 = datosFiltrados.Voltage1; corrientes1 = datosFiltrados.Current1_Amps1_; </pre>		

```

voltajes2 = datosFiltrados.Voltage2;
corrientes2 = datosFiltrados.Current2_Amps2_;

voltajes3 = datosFiltrados.Voltage3;
corrientes3 = datosFiltrados.Current3_Amps3_;

PromedioVoltajes = datosFiltrados.PromedioVoltaje;
PromedioCorrientes = datosFiltrados.PromedioCorriente;

% Encontrar los valores únicos de potencia
valoresUnicos = unique(PotenciasActivas);

% Para cada valor único de potencia
for i = 1:length(valoresUnicos)
    valorActual = valoresUnicos(i);

    % Encontrar todas las filas con este valor de potencia
    filas = PotenciasActivas == valorActual;

    % Extraer los voltajes y corrientes correspondientes
    voltajesCorrespondientes1 = voltajes1(filas);
    corrientesCorrespondientes1 = corrientes1(filas);

    voltajesCorrespondientes2 = voltajes2(filas);
    corrientesCorrespondientes2 = corrientes2(filas);

    voltajesCorrespondientes3 = voltajes3(filas);
    corrientesCorrespondientes3 = corrientes3(filas);

    PromedioVoltajeCorrespondientes = PromedioVoltajes(filas);
    PromedioCorrienteCorrespondientes = PromedioCorrientes(filas);

```

```

% Mostrar los resultados
disp(['Para la Potencia Activa : ' num2str(valorActual)]);
disp(['*** Los Voltajes 1 son:']);
disp(voltajesCorrespondientes1);
disp(['*** Las Corrientes 1 son:']);
disp(corrientesCorrespondientes1);

%disp(['Para la Potencia Activa : ' num2str(valorActual)]);
disp(['*** Los Voltajes son 2:']);
disp(voltajesCorrespondientes2);
disp(['*** Las Corrientes son 2:']);
disp(corrientesCorrespondientes2);

%disp(['Para la Potencia Activa : ' num2str(valorActual)]);
disp(['*** Los Voltajes 3 son:']);
disp(voltajesCorrespondientes3);
disp(['*** Las Corrientes 3 son:']);
disp(corrientesCorrespondientes3);

disp(['*** Los Voltajes Promedios son:']);
disp(PromedioVoltajeCorrespondientes);
disp(['*** Las Corrientes Promedios son:']);
disp(PromedioCorrienteCorrespondientes);
end

% Filtrar valores de potencia, voltaje y corriente que sean cero o negativos
indicesValidos = PotenciasActivas > 0 & voltajes1 > 0 & corrientes1 > 0 & voltajes2 > 0 &
corrientes2 > 0 & voltajes3 > 0 & corrientes3 > 0 & PromedioVoltajes > 0 &
PromedioCorrientes > 0;

PotenciasFiltradas = PotenciasActivas(indicesValidos);

```

```

voltajesFiltrados1 = voltajes1(indicesValidos);
corrientesFiltradas1 = corrientes1(indicesValidos);

voltajesFiltrados2 = voltajes2(indicesValidos);
corrientesFiltradas2 = corrientes2(indicesValidos);

voltajesFiltrados3 = voltajes3(indicesValidos);
corrientesFiltradas3 = corrientes3(indicesValidos);

PromediovoltajesFiltrados = PromedioVoltajes(indicesValidos);
PromediocorrientesFiltradas = PromedioCorrientes(indicesValidos);
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 1
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados1, 'b');
title('Potencia vs Voltaje 1');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 1 (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje1 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados1, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV1 = coeficientesVoltaje1(1); % Coeficiente cuadrático
bV1 = coeficientesVoltaje1(2); % Coeficiente lineal
cV1 = coeficientesVoltaje1(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 1:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV1)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV1)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV1)]);

```

```

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
PotenciasFit = linspace(min(PotenciasFiltradas), max(PotenciasFiltradas), 200);
voltajesFit1 = polyval(coeficientesVoltaje1, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit1, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 2
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados2, 'b');
title('Potencia vs Voltaje 2');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 2 (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje2 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados2, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV2 = coeficientesVoltaje2(1); % Coeficiente cuadrático
bV2 = coeficientesVoltaje2(2); % Coeficiente lineal
cV2 = coeficientesVoltaje2(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 2:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV2)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV2)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV2)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia

```

```

voltajesFit2 = polyval(coeficientesVoltaje2, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit2, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 3
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados3, 'b');
title('Potencia vs Voltaje 3');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 3 (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje3 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados3, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV3 = coeficientesVoltaje3(1); % Coeficiente cuadrático
bV3 = coeficientesVoltaje3(2); % Coeficiente lineal
cV3 = coeficientesVoltaje3(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 3:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV3)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV3)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV3)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
voltajesFit3 = polyval(coeficientesVoltaje3, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje

```

```

hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit3, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Promedio Voltaje
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, PromediovoltajesFiltrados, 'b');
title('Potencia vs Promedio Voltajes');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Promedio voltajes (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesPromedioVoltajes = polyfit(PotenciasFiltradas, PromediovoltajesFiltrados, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aVP = coeficientesPromedioVoltajes(1); % Coeficiente cuadrático
bVP = coeficientesPromedioVoltajes(2); % Coeficiente lineal
cVP = coeficientesPromedioVoltajes(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Promedio Voltaje:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aVP)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bVP)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cVP)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
PromedioVoltajesFit = polyval(coeficientesPromedioVoltajes, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, PromedioVoltajesFit, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

```

```

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente 1
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas1, 'r');
title('Potencia vs Corriente 1');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 1 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente1 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas1, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC1 = coeficientesCorriente1(1); % Coeficiente cuadrático
bC1 = coeficientesCorriente1(2); % Coeficiente lineal
cC1 = coeficientesCorriente1(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 1:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC1)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC1)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC1)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit1 = polyval(coeficientesCorriente1, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit1, 'b-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente
figure;

```

```

scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas2, 'r');
title('Potencia vs Corriente 2');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 2 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente2 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas2, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC2 = coeficientesCorriente2(1); % Coeficiente cuadrático
bC2 = coeficientesCorriente2(2); % Coeficiente lineal
cC2 = coeficientesCorriente2(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 2:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC2)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC2)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC2)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit2 = polyval(coeficientesCorriente2, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit2, 'b-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente 3
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas3, 'r');
title('Potencia vs Corriente 3');

```

```

xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 3 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente3 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas3, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC3 = coeficientesCorriente3(1); % Coeficiente cuadrático
bC3 = coeficientesCorriente3(2); % Coeficiente lineal
cC3 = coeficientesCorriente3(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 3:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC3)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC3)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC3)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit3 = polyval(coeficientesCorriente3, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit3, 'b-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Promedio Corriente
figure;
scatter(PotenciasFiltradas, PromediocorrientesFiltradas, 'r');
title('Potencia vs Promedio Corriente');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Promedio Corriente (Amperios)');
grid on;

```

```

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesPomedioCorriente = polyfit(PotenciasFiltradas, PromediocorrientesFiltradas, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aCP = coeficientesPomedioCorriente(1); % Coeficiente cuadrático
bCP = coeficientesPomedioCorriente(2); % Coeficiente lineal
cCP = coeficientesPomedioCorriente(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Promedio Corriente:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aCP)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bCP)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cCP)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
PromedioCorrientesFit = polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, PromedioCorrientesFit, 'b-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%%%%%%%%%
% Calcular métricas de evaluación para voltaje 1
R_squared_V1 = 1 - sum((voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados1 - mean(voltajesFiltrados1)).^2);
RMSE_V1 = sqrt(mean((voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V1 = mean(abs(voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 1:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V1);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V1);

```

```

fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n', MAE_V1);

% Calcular métricas de evaluación para Voltaje 2
R_squared_V2 = 1 - sum((voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados2 - mean(voltajesFiltrados2)).^2);
RMSE_V2 = sqrt(mean((voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V2 = mean(abs(voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 2:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V2);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V2);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_V2);

% Calcular métricas de evaluación para Voltaje 3
R_squared_V3 = 1 - sum((voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados3 - mean(voltajesFiltrados3)).^2);
RMSE_V3 = sqrt(mean((voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V3 = mean(abs(voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 3:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V3);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V3);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_V3);

% Calcular métricas de evaluación para Promedio Voltaje
R_squared_PV = 1 - sum((PromediovoltajesFiltrados -
polyval(coeficientesPromedioVoltajes,
PotenciasFiltradas)).^2) /
sum((PromediovoltajesFiltrados - mean(PromediovoltajesFiltrados)).^2);
RMSE_PV = sqrt(mean((PromediovoltajesFiltrados -
polyval(coeficientesPromedioVoltajes, PotenciasFiltradas)).^2));

```

```

MAE_PV = mean(abs(PromedioVoltajesFiltrados - polyval(coeficientesPromedioVoltajes,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Promedio Voltaje:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_PV);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_PV);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_PV);

%%

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 1
R_squared_C1 = 1 - sum((corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas1 - mean(corrientesFiltradas1)).^2);
RMSE_C1 = sqrt(mean((corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_C1 = mean(abs(corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 1:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C1);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C1);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C1);

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 2
R_squared_C2 = 1 - sum((corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas2 - mean(corrientesFiltradas2)).^2);
RMSE_C2 = sqrt(mean((corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_C2 = mean(abs(corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 2:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C2);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C2);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C2);

```

```

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 3
R_squared_C3 = 1 - sum((corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas3 - mean(corrientesFiltradas3)).^2);
RMSE_C3 = sqrt(mean((corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_C3 = mean(abs(corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 3:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C3);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C3);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C3);

% Calcular métricas de evaluación para Promedio Corriente
R_squared_PromedioCorriente = 1 - sum((PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente,
PotenciasFiltradas)).^2) /
sum((PromediorcorrientesFiltradas - mean(PromediorcorrientesFiltradas)).^2);
RMSE_PromedioCorriente = sqrt(mean((PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_PromedioCorriente = mean(abs(PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Promedio Corriente:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_PromedioCorriente);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_PromedioCorriente);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_PromedioCorriente);

```

ANEXO H	CODIGO EN MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES – POTENCIA REACTIVA	
<pre> % TEMA DE TESIS: % “Obtención del Modelo de Carga Polinomial para un Sistema de bombeo de % agua sanitaria a partir de mediciones experimentales” </pre>		

```

%          CONIDERACIÓN POTENCIA REACTIVA TOTAL
%%
% Leer los datos desde un archivo de Excel
filename = 'DatosPrueba.xlsx';
data = readtable(filename);

% Convertir la columna de fecha y hora a tipo datetime
% Reemplaza 'NombreColumnaFechaHora' con el nombre real de tu columna de fecha y hora
data.FechaHora = datetime(data.Corregido, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm');

% Definir las fechas límites
fechaInicio = datetime('04/08/2021 00:00', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm');
fechaFin = datetime('04/08/2021 23:59', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm');

% Filtrar las filas que caen dentro del rango de fechas
filasEnRango = data.FechaHora >= fechaInicio & data.FechaHora <= fechaFin;

% Aplicar el filtro a tus datos
datosFiltrados = data(filasEnRango, :);

% Extraer las columnas de potencia, voltaje y corriente de los datos filtrados
% Asegúrate de reemplazar 'NombreColumnaPotencia', 'NombreColumnaVoltaje', y
'NombreColumnaCorriente'
% con los nombres reales de tus columnas en el archivo Excel
PotenciasReactivas = datosFiltrados.TotalReactivePower;

voltajes1 = datosFiltrados.Voltage1;
corrientes1 = datosFiltrados.Current1_Amps1_;

voltajes2 = datosFiltrados.Voltage2;
corrientes2 = datosFiltrados.Current2_Amps2_;

```

```

voltajes3 = datosFiltrados.Voltage3;
corrientes3 = datosFiltrados.Current3_Amps3_;

PromedioVoltajes = datosFiltrados.PromedioVoltaje;
PromedioCorrientes = datosFiltrados.PromedioCorriente;

% Encontrar los valores únicos de potencia
valoresUnicos = unique(PotenciasReactivas);

% Para cada valor único de potencia
for i = 1:length(valoresUnicos)
    valorActual = valoresUnicos(i);

    % Encontrar todas las filas con este valor de potencia
    filas = PotenciasReactivas == valorActual;

    % Extraer los voltajes y corrientes correspondientes
    voltajesCorrespondientes1 = voltajes1(filas);
    corrientesCorrespondientes1 = corrientes1(filas);

    voltajesCorrespondientes2 = voltajes2(filas);
    corrientesCorrespondientes2 = corrientes2(filas);

    voltajesCorrespondientes3 = voltajes3(filas);
    corrientesCorrespondientes3 = corrientes3(filas);

    PromedioVoltajeCorrespondientes = PromedioVoltajes(filas);
    PromedioCorrienteCorrespondientes = PromedioCorrientes(filas);

    % Mostrar los resultados
    disp(['Para la Potencia Reactiva : ' num2str(valorActual)]);
    disp(['*** Los Voltajes 1 son:']);

```

```

disp(voltajesCorrespondientes1);
disp(['*** Las Corrientes 1 son:']);
disp(corrientesCorrespondientes1);

%disp(['Para la Potencia Reactiva : ' num2str(valorActual)]);
disp(['*** Los Voltajes son 2:']);
disp(voltajesCorrespondientes2);
disp(['*** Las Corrientes son 2:']);
disp(corrientesCorrespondientes2);

%disp(['Para la Potencia Reactiva : ' num2str(valorActual)]);
disp(['*** Los Voltajes 3 son:']);
disp(voltajesCorrespondientes3);
disp(['*** Las Corrientes 3 son:']);
disp(corrientesCorrespondientes3);

disp(['*** Los Voltajes Promedios son:']);
disp(PromedioVoltajeCorrespondientes);
disp(['*** Las Corrientes Promedios son:']);
disp(PromedioCorrienteCorrespondientes);
end

% Filtrar valores de potencia, voltaje y corriente que sean cero o negativos
indicesValidos = PotenciasReactivas > 0 & voltajes1 > 0 & corrientes1 > 0 & voltajes2 > 0
& corrientes2 > 0 & voltajes3 > 0 & corrientes3 > 0 & PromedioVoltajes > 0 &
PromedioCorrientes > 0;

PotenciasFiltradas = PotenciasReactivas(indicesValidos);

voltajesFiltrados1 = voltajes1(indicesValidos);
corrientesFiltradas1 = corrientes1(indicesValidos);

voltajesFiltrados2 = voltajes2(indicesValidos);

```

```

corrientesFiltradas2 = corrientes2(indicesValidos);

voltajesFiltrados3 = voltajes3(indicesValidos);
corrientesFiltradas3 = corrientes3(indicesValidos);

PromediovoltajesFiltrados = PromedioVoltajes(indicesValidos);
PromediorcorrientesFiltradas = PromedioCorrientes(indicesValidos);

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 1
colorHex = '#0072BD';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados1, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Voltaje 1');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 1 (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje1 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados1, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV1 = coeficientesVoltaje1(1); % Coeficiente cuadrático
bV1 = coeficientesVoltaje1(2); % Coeficiente lineal
cV1 = coeficientesVoltaje1(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 1:');

```

```

disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV1)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV1)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV1)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
PotenciasFit = linspace(min(PotenciasFiltradas), max(PotenciasFiltradas), 200);
voltajesFit1 = polyval(coeficientesVoltaje1, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit1, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 2
colorHex = '#0072BD';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados2, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Voltaje 2');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 2 (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje2 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados2, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV2 = coeficientesVoltaje2(1); % Coeficiente cuadrático

```

```

bV2 = coeficientesVoltaje2(2); % Coeficiente lineal
cV2 = coeficientesVoltaje2(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 2:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV2)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV2)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV2)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
voltajesFit2 = polyval(coeficientesVoltaje2, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit2, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Voltaje 3
colorHex = '#0072BD';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados3, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Voltaje 3');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Voltaje 3 (V)');
grid on;

```

```

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesVoltaje3 = polyfit(PotenciasFiltradas, voltajesFiltrados3, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aV3 = coeficientesVoltaje3(1); % Coeficiente cuadrático
bV3 = coeficientesVoltaje3(2); % Coeficiente lineal
cV3 = coeficientesVoltaje3(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Voltaje 3:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aV3)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bV3)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cV3)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
voltajesFit3 = polyval(coeficientesVoltaje3, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, voltajesFit3, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Promedio Voltaje
colorHex = '#0072BD';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, PromediovoltajesFiltrados, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Promedio Voltajes');

```

```

xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Promedio voltajes (V)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Voltaje
coeficientesPromedioVoltajes = polyfit(PotenciasFiltradas, PromediovoltajesFiltrados, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Voltaje
aVP = coeficientesPromedioVoltajes(1); % Coeficiente cuadrático
bVP = coeficientesPromedioVoltajes(2); % Coeficiente lineal
cVP = coeficientesPromedioVoltajes(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Voltaje con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Promedio Voltaje:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aVP)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bVP)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cVP)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia
PromedioVoltajesFit = polyval(coeficientesPromedioVoltajes, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Voltaje
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, PromedioVoltajesFit, 'r-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente 1
colorHex = '#EDB120';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

```

```

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas1, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Corriente 1');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 1 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente1 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas1, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC1 = coeficientesCorriente1(1); % Coeficiente cuadrático
bC1 = coeficientesCorriente1(2); % Coeficiente lineal
cC1 = coeficientesCorriente1(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 1:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC1)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC1)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC1)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit1 = polyval(coeficientesCorriente1, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit1, 'k-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%

% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente 2
colorHex = #EDB120';

```

```

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas2, 'MarkerFaceColor', colorRGB,
'MarkerEdgeColor', colorRGB, 'MarkerFaceAlpha', 0);
title('Potencia vs Corriente 2');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 2 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente2 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas2, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC2 = coeficientesCorriente2(1); % Coeficiente cuadrático
bC2 = coeficientesCorriente2(2); % Coeficiente lineal
cC2 = coeficientesCorriente2(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 2:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC2)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC2)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC2)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit2 = polyval(coeficientesCorriente2, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit2, 'k-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

```

```

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Corriente 3
colorHex = '#EDB120';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas3, 'MarkerFaceColor', 'none',
'MarkerEdgeColor', colorRGB);
title('Potencia vs Corriente 3');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Corriente 3 (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesCorriente3 = polyfit(PotenciasFiltradas, corrientesFiltradas3, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aC3 = coeficientesCorriente3(1); % Coeficiente cuadrático
bC3 = coeficientesCorriente3(2); % Coeficiente lineal
cC3 = coeficientesCorriente3(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Corriente 3:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.4f', aC3)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.4f', bC3)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.4f', cC3)]);

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
corrientesFit3 = polyval(coeficientesCorriente3, PotenciasFit);

```

```

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, corrientesFit3, 'k-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');

%%
% Crear gráfica de dispersión para Potencia vs Promedio Corriente
colorHex = #EDB120';

% Convertir el código hexadecimal a un vector RGB
colorRGB = sscanf(colorHex(2:end), '%2x') / 255;

figure;
scatter(PotenciasFiltradas, PromediorcorrientesFiltradas, 'MarkerFaceColor', 'none',
'MarkerEdgeColor', colorRGB);
title('Potencia vs Promedio Corriente');
xlabel('Potencia (Watts)');
ylabel('Promedio Corriente (Amperios)');
grid on;

% Ajustar un polinomio de segundo grado para Corriente
coeficientesPomedioCorriente = polyfit(PotenciasFiltradas, PromediorcorrientesFiltradas, 2);
% Coeficientes del polinomio cuadrático para Corriente
aCP = coeficientesPomedioCorriente(1); % Coeficiente cuadrático
bCP = coeficientesPomedioCorriente(2); % Coeficiente lineal
cCP = coeficientesPomedioCorriente(3); % Término independiente

% Imprimir los coeficientes para Corriente con dos decimales
disp('Coeficientes de regresión polinomial para Promedio Corriente:');
disp(['Coeficiente cuadrático (a): ', sprintf('%.5f', aCP)]);
disp(['Coeficiente lineal (b): ', sprintf('%.5f', bCP)]);
disp(['Término independiente (c): ', sprintf('%.5f', cCP)]);

```

```

% Evaluar el polinomio en un rango de valores de potencia para Corriente
PromedioCorrientesFit = polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFit);

% Añadir la curva de ajuste al gráfico de Corriente
hold on; % Mantiene la gráfica actual
plot(PotenciasFit, PromedioCorrientesFit, 'k-');
legend('Datos', 'Ajuste Polinomial');
%%
% Calcular métricas de evaluación para voltaje 1
R_squared_V1 = 1 - sum((voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados1 - mean(voltajesFiltrados1)).^2);
RMSE_V1 = sqrt(mean((voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V1 = mean(abs(voltajesFiltrados1 - polyval(coeficientesVoltaje1,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 1:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V1);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V1);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n', MAE_V1);

% Calcular métricas de evaluación para Voltaje 2
R_squared_V2 = 1 - sum((voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados2 - mean(voltajesFiltrados2)).^2);
RMSE_V2 = sqrt(mean((voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V2 = mean(abs(voltajesFiltrados2 - polyval(coeficientesVoltaje2,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 2:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V2);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V2);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_V2);

```

```

% Calcular métricas de evaluación para Voltaje 3
R_squared_V3 = 1 - sum((voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((voltajesFiltrados3 - mean(voltajesFiltrados3)).^2);
RMSE_V3 = sqrt(mean((voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_V3 = mean(abs(voltajesFiltrados3 - polyval(coeficientesVoltaje3,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Voltaje 3:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_V3);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_V3);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_V3);

% Calcular métricas de evaluación para Promedio Voltaje
R_squared_PV = 1 - sum((PromediovoltajesFiltrados -
polyval(coeficientesPromedioVoltajes, PotenciasFiltradas)).^2) /
sum((PromediovoltajesFiltrados - mean(PromediovoltajesFiltrados)).^2);
RMSE_PV = sqrt(mean((PromediovoltajesFiltrados -
polyval(coeficientesPromedioVoltajes, PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_PV = mean(abs(PromediovoltajesFiltrados - polyval(coeficientesPromedioVoltajes,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Promedio Voltaje:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_PV);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_PV);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_PV);

%%

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 1
R_squared_C1 = 1 - sum((corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas1 - mean(corrientesFiltradas1)).^2);
RMSE_C1 = sqrt(mean((corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)).^2));

```

```

MAE_C1 = mean(abs(corrientesFiltradas1 - polyval(coeficientesCorriente1,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 1:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C1);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C1);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C1);

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 2
R_squared_C2 = 1 - sum((corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas2 - mean(corrientesFiltradas2)).^2);
RMSE_C2 = sqrt(mean((corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_C2 = mean(abs(corrientesFiltradas2 - polyval(coeficientesCorriente2,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 2:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C2);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C2);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C2);

% Calcular métricas de evaluación para Corriente 3
R_squared_C3 = 1 - sum((corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)).^2) / sum((corrientesFiltradas3 - mean(corrientesFiltradas3)).^2);
RMSE_C3 = sqrt(mean((corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_C3 = mean(abs(corrientesFiltradas3 - polyval(coeficientesCorriente3,
PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Corriente 3:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_C3);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_C3);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_C3);

```

```
% Calcular métricas de evaluación para Promedio Corriente
R_squared_PromedioCorriente = 1 - sum((PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFiltradas)).^2) /
sum((PromediorcorrientesFiltradas - mean(PromediorcorrientesFiltradas)).^2);
RMSE_PromedioCorriente = sqrt(mean((PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFiltradas)).^2));
MAE_PromedioCorriente = mean(abs(PromediorcorrientesFiltradas -
polyval(coeficientesPomedioCorriente, PotenciasFiltradas)));

disp('Métricas de evaluación para Promedio Corriente:');
fprintf('Coeficiente de determinación (R²): %.4f\n', R_squared_PromedioCorriente);
fprintf('Error Cuadrático Medio (RMSE): %.4f\n', RMSE_PromedioCorriente);
fprintf('Error Absoluto Medio (MAE): %.4f\n\n', MAE_PromedioCorriente);
```

ANEXO I

**CURVAS OBTENIDAS POTENCIA
ACTIVA**

