

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA MODELACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE CARGAS EN BASE A MEDICIONES EN CAMPO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

WILSON FRANCISCO BRITO EGAS

DIRECTOR: M.SC. -ING. JUAN CARLOS PLAZARTE ACHIG

CODIRECTOR: DR. -ING. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

Quito, septiembre 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Wilson Francisco Brito Egas, bajo nuestra supervisión.

M.SC. -ING. JUAN CARLOS PLAZARTE ACHIG
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DR. -ING. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Wilson Francisco Brito Egas, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



WILSON FRANCISCO BRITO EGAS

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Lucía Egas y Estuardo Brito, por darme su apoyo incondicional a lo largo de mi vida estudiantil.

A mi hermanos, Luis y Guido quienes siempre han estado conmigo en todo momento y me han inspirado a ser a persona que soy el día de hoy.

A mis cuñadas por el constante apoyo durante el desarrollo de mi carrera.

A la Escuela Politécnica Nacional, por formarme en el ámbito académico y profesional.

Al M.Sc. -Ing. Juan Carlos Plazarte Achig y Dr. -Ing. Hugo Neptalí Arcos Martínez por todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

A todos mis amigos con quienes compartí momentos de alegría y tristeza durante estos años en la universidad, gracias por su apoyo y su sincera amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. GENERAL	2
1.1.2. ESPECÍFICO	2
1.2. ALCANCE	2
1.3. MARCO TEÓRICO	3
1.3.1. CARGA ELÉCTRICA	3
1.3.2. MODELADO DE LA CARGA	4
1.3.3. MODELADO ESTÁTICO DE LA CARGA	5
1.3.4. METODOS DE MODELADO	8
1.3.5. REGRESIÓN Y MODELADO	10
1.3.6. MEDIDAS PARA EL DESEMPEÑO DEL MODELO	15
1.3.7. PYTHON	17
1.3.8. VALORES SEPARADOS POR COMA (CSV)	21
1.3.9. FILTRO SAVITZKY–GOLAY (SAVGOL)	21
1.3.10. CONVERSIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1. ADECUACION DEL MODELO POLINOMIAL O ZIP DE LA CARGA	24
2.2. ADECUACIÓN DEL MODELO EXPONENCIAL	25
2.3. ADECUACIÓN DEL MODELO LINEAL	25
2.4. ADQUISICIÓN DE DATOS	25
2.5. AJUSTE DE ESCALA AMTEK TR-300	26
2.6. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL REGISTRADOR CON PYTHON	27
2.7. ALGORITMO GENERAL DEL PROGRAMA	29
2.8. REUSABILIDAD	30
2.9. SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRENAMIENTO Y DE PRUEBA	31
2.10. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	31

2.10.1.	VENTANA DE INICIO	33
2.10.2.	VENTANA PRINCIPAL.....	33
2.10.3.	MODULARIZACIÓN	38
2.11.	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS.....	39
2.12.	SUBMUESTREO.....	39
3.	RESULTADO Y DISCUSIÓN	43
3.1.	MODELADO DE UNA CARGA EN LA SUBESTACIÓN MULALÓ.....	43
3.2.	MODELADO DE UNA CARGA EN LA SUBESTACIÓN VICENTINA	48
3.3.	SIMULACIÓN EN POWER FACTORY	52
3.3.1.	SUBESTACION MULALÓ.....	52
3.3.2.	SUBESTACIÓN VICENTINA	53
3.4.	CAMBIO DE FRECUENCIA DE MUESTRAS	54
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
4.1.	CONCLUSIONES	60
4.2.	RECOMENDACIONES.....	61
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	ANEXOS	66

RESUMEN

En este documento se desarrolla una herramienta computacional para el modelado estático de cargas eléctricas, basadas en mediciones de campo, usando el lenguaje de programación Python. Los modelos matemáticos usados para ajustar las mediciones fueron el modelo polinomial o ZIP y el modelo exponencial.

La interfaz gráfica de la herramienta fue diseñada a través del módulo PyQt en Python y el ajuste de curva para obtener los parámetros de los modelos matemáticos con los módulos SciPy y Numpy

Los datos de las mediciones con las que se realizó la evaluación práctica del programa fueron adquiridos a través de un equipo registrador instalado en las subestaciones Mulaló y Vicentina en una bahía de carga.

PALABRAS CLAVE: carga eléctrica, modelo matemático, Python.

ABSTRACT

In this document, an informatic tool is developed using Python to obtain the static load representation of an electric load based in field measurements. The mathematical models used to fit the measurements obtained where the polynomial or ZIP model and the exponential model.

The user interface for this tool was developed using PyQt and the curve fitting algorithm that obtains the parameters for the mathematical models was developed using the modules SciPy and Numpy.

The measurements used to perform a practical evaluation of the tool were obtained by connecting a register equipment in “Mulaló” and “La Vicentina” substation in a load bay.

1. INTRODUCCIÓN

La modelación matemática de la carga eléctrica en sistemas eléctricos de potencia usualmente no es considerada en los estudios de planificación y operación debido al desafío que representa modelar la diversidad y complejidad de forma matemática, además, el rápido avance de las tecnologías mantiene en constante cambio su comportamiento. A esto se le debe agregar que la carga eléctrica es diferente para distintas horas de un mismo día, para diferentes días, semanas e incluso temporalidades estacionarias como invierno y verano [1], [2]. En nuestro sistema eléctrico ecuatoriano nunca se ha realizado un intento formal y debidamente actualizado de cálculo de modelo de carga para todo el SNI.

Una carga eléctrica bien representada matemáticamente a través de un modelo permitirá determinar adecuados estudios de estabilidad de voltaje, flujos de potencia óptimos entre otros [3].

El modelado de la carga se puede obtener a través del método de aproximación basado en mediciones de campo, en donde se toman mediciones de potencias (activa y reactiva) y voltajes RMS en la bahía de carga de una subestación, con estos datos se pueda obtener los coeficientes del modelo polinomial o ZIP, o el exponente del modelo exponencial.

En varios paquetes de simulación de sistemas eléctricos de potencia, siendo uno de ellos PowerFactory, la aplicación de modelos de carga está disponible para su configuración mediante los modelos polinomial y exponencial para análisis de estado estable y del dominio del tiempo [4], sin embargo esta configuración usualmente esta desactivada durante las simulaciones de los sistemas.

En este trabajo se desarrolla una herramienta computacional que permita, a través de datos obtenidos a partir de mediciones obtener los parámetros para los modelos de carga polinomial y exponencial, esta herramienta proporcionará información del desempeño del modelo como el MSE y el RMSE.

Otro punto importante de este trabajo es el uso del lenguaje de código abierto Python, pues permitiría una adaptabilidad sencilla a cambios en los modelos matemáticos de la carga que pudiesen sugerir en un futuro.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional con interfaz gráfica que permita facilitar la obtención de los parámetros del modelado estático de cargas en el Sistema Nacional Interconectado de Ecuador.

1.1.2. ESPECÍFICO

- Realizar la investigación en documentos existentes, libros, artículos científicos, técnicos etc, referentes al modelado estático de cargas.
- Realizar un programa computacional que permita obtener el modelo estático de la carga.
- Obtener mediciones de uno o varios puntos de carga del Sistema Nacional de Transmisión.
- Obtener los parámetros del modelado de carga estático a partir de las mediciones obtenidas usando el programa creado.
- Analizar resultados.

1.2. ALCANCE

El desarrollo de este trabajo de titulación se enfoca en la creación de una herramienta computacional, en el lenguaje de programación Python, que permita modelar la carga eléctrica mediante modelos matemáticos incluyendo una interfaz de usuario que facilite el trabajo a los profesionales.

Los modelos matemáticos que se incluirán en el desarrollo de la herramienta será el modelo polinomial lógico (con dos restricciones) y exacto (con una restricción), el modelo lineal y el modelo exponencial de la carga, para lo cual se recopilarán datos de voltaje, potencia activa y reactiva de la bahía de una subestación y usando el módulo de optimización de SciPy calcular los coeficientes de los modelos. Además, se incluirá una evaluación del desempeño del modelo con la finalidad de facilitar la selección de modelo más adecuado para la representación de la carga.

Un equipo registrador conectado a un transformador de corriente y a un transformador de voltaje en la bahía de carga de una subestación se encargará de recopilar los datos

necesarios y estos serán importados por la herramienta computacional para su respectivo procesamiento.

La herramienta cumplirá con los siguientes puntos:

- Seleccionar el archivo que contiene los datos para modelar desde la exportación del programa Display Station 32 o desde una plantilla predeterminada.
- Seleccionar el rango de datos para analizar.
- Dar la opción de aplicar un filtro para disminuir el ruido de la señal (opcional).
- Aplicar una optimización para el rango de datos definido con el fin de obtener los coeficientes aproximados del modelo de carga polinomial y exponencial.
- Presentar los resultados en una interfaz gráfica.

1.3. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los conceptos teóricos como la definición de carga eléctrica, métodos de modelado, medidas de desempeño entre otros, que se usaron como fundamento para el desarrollar este trabajo.

1.3.1. CARGA ELÉCTRICA

En una red de potencia, la carga eléctrica es un componente de un sistema que consume una potencia activa (P) y una potencia reactiva (Q), las cuales pueden ser: motores, luces, dispositivos electrónicos entre otras [5]. Se puede generalizar como la potencia consumida total por los dispositivos conectados a dicho sistema [6]. Matemáticamente una carga puede ser representada por:

$$\bar{S} = P + jQ \quad (1.1)$$

$$P = S \cos(\theta) \quad (1.2)$$

$$Q = S \sin(\theta) \quad (1.3)$$

Otra forma de representación de la carga es en función del voltaje, frecuencia y tiempo, estas representaciones se clasifican en: modelo estático y modelo dinámico. Este trabajo se enfoca en el modelado estático de la carga.

1.3.2. MODELADO DE LA CARGA

Una carga eléctrica puede modelarse como una función dependiente de variables como voltaje y frecuencia para un modelado estático; voltaje, frecuencia y tiempo para el modelado dinámico [7]. Un correcto modelado de un sistema eléctrico se obtiene al modelar todos los componentes que lo conforman, como: motores, generadores, actuadores, protecciones, líneas de transmisión, cargas etc. El tener un modelo preciso de los componentes que conforman la red se puede reducir errores en simulaciones y mejorar la seguridad durante la operación.

Para realizar el desarrollo del modelado de cargas se consideran dos aproximaciones básicas:

- Modelos basados en Mediciones
- Modelos basados en componentes

Las aproximaciones basadas en mediciones implican la medición en un punto del SEP, usualmente en el alimentador de una subestación; aquí se colocan instrumentos de medición que registren voltaje, potencia activa, potencia reactiva y frecuencia.

La principal ventaja de usar esta aproximación es la disponibilidad de datos actuales del sistema de estudio y la posibilidad de determinar la evolución estacional, así como desviaciones de la operación normal, sin embargo, sus desventajas son:

- Los modelos de carga para una subestación no son compatibles para otras subestaciones.
- La determinación de las características de la carga a través de un gran rango de voltaje y frecuencia no resulta práctica.

Las aproximaciones basadas en componentes implican desarrollar un modelo compuesto de la carga usando la información de sus partes constitutivas. Por ejemplo: las características de cada componente de carga individual, el tipo de subestación. La ventaja de esta aproximación es que no requiere de mediciones en campo si no que se basa en las características de los modelos que se determinan teóricamente [8]. La mayor desventaja es la dificultad de recolectar la información de los componentes de la carga y su constitución, pues si bien existen parámetros representativos, existe una gran variedad de diferentes conjuntos de parámetros para un mismo dispositivo, lo cual dificulta la selección de los parámetros más “apropiados” para el modelo [2].

Para este trabajo, se realiza una aproximación del modelo estático de la carga basándose en mediciones.

1.3.3. MODELADO ESTÁTICO DE LA CARGA

Cuando se efectúa un flujo de potencia en una red, la potencia activa y reactiva de una carga son constantes, como se muestra en las siguientes ecuaciones

$$P = P_L \quad (1.4)$$

$$Q = Q_L \quad (1.5)$$

Mientras el voltaje de la barra no exceda los límites definidos en las bandas de voltaje, las ecuaciones (1.4) y (1.5) representan a la carga como tal, pero si el voltaje sobrepasa o disminuye dicho límite, las ecuaciones cambian al modelo de impedancia constante como se muestra en las siguientes ecuaciones [8]:

$$P = \frac{P_0 V^2}{V_{lim}^2} \quad (1.6)$$

$$Q = \frac{Q_0 V^2}{V_{lim}^2} \quad (1.7)$$

En donde V_{lim} es el valor límite del voltaje.

Las expresiones en las ecuaciones (1.4) y (1.5), no muestran dependencia de la carga al voltaje es decir que la carga es constante, y las expresiones (1.6) y (1.7) son un derivado del modelo de carga estático del tipo exponencial, que se discutirá más adelante.

En el modelo estático de la carga, se expresa la P y Q consumida por una carga en cualquier instante del tiempo como una expresión algebraica dependiente del voltaje y frecuencia de la barra en donde esté conectada, en ese mismo instante [6]. La representación general de los modelos de carga en función del voltaje y frecuencia están dadas por las siguientes expresiones:

$$P_i = f_P(V_i, f_i) \quad (1.8)$$

$$Q_i = f_Q(V_i, f_i) \quad (1.9)$$

1.3.3.1. Modelo Exponencial de la Carga

El modelo exponencial es una ecuación usada tradicionalmente para representar la dependencia de la carga al voltaje mediante las siguientes expresiones [7]:

$$P = P_0(\bar{V})^a(1+k_{pf}\Delta f) \quad (1.10)$$

$$Q = Q_0(\bar{V})^b(1+k_{qf}\Delta f) \quad (1.11)$$

En donde:

P_0 y Q_0 es la potencia a la cual se inicia el estudio.

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

V_0 : voltaje al cual se inicia el estudio.

$(1+k_{qf}\Delta f)$ es el factor de dependencia de la carga a la frecuencia.

$$\Delta f = \frac{f - f_n}{f_n}$$

En [7] y [2] se menciona que el coeficiente de dependencia de frecuencia no se utiliza porque se asume que la frecuencia en una barra puede llegar a considerarse invariable, o que su variabilidad en el tiempo es demasiado pequeña por lo que puede ser despreciable convirtiendo las expresiones (1.10) y (1.11) en:

$$P = P_0(\bar{V})^a \quad (1.12)$$

$$Q = Q_0(\bar{V})^b \quad (1.13)$$

Las expresiones (1.12) y (1.13) pueden encontrarse en las tablas de [9] en donde se menciona que esta expresión es usada para representar cargas del tipo residencial, comercial e industrial, al igual que las expresiones (1.10) y (1.11) pero con la dependencia de la carga a la frecuencia.

Para este modelado, los únicos coeficientes que se deben ajustar al comportamiento basado en mediciones son los exponentes a y b , en [1] y [6] se menciona que dichos coeficientes deben restringirse a la siguiente condición:

$$a, b \geq 0 \quad (1.14)$$

Sin embargo, el mismo autor de [6] menciona que para ciertos tipos de cargas específicas, es posible que los exponentes tomen valores negativos, por lo que para este trabajo no se aplicará la restricción en los exponentes.

1.3.3.2. Modelo Polinomial de la Carga (ZIP)

Este modelo se presenta como una alternativa al modelo exponencial para representar la dependencia de la carga al voltaje a través de una ecuación de segundo orden. Este modelo también es comúnmente conocido como modelo ZIP pues representa los componentes de impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P) mediante las expresiones [1]:

$$P = P_0 [P_p + I_p(\bar{V})^1 + Z_p(\bar{V})^2] (1 + k_{pf}\Delta f) \quad (1.15)$$

$$Q = Q_0 [P_q + I_q(\bar{V})^1 + Z_q(\bar{V})^2] (1 + k_{qf}\Delta f) \quad (1.16)$$

Donde:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

V_0 : Voltaje al inicio del período de evaluación

P_0 : Potencia al inicio del período de evaluación

Los coeficientes Z, I y P definen la proporción de impedancia, corriente y potencia constante que componen a la carga.

Este modelo puede considerarse un derivado del modelo exponencial, en donde la carga se compone de 3 componentes: Z para el componente de impedancia constante, I para el de corriente constante y P para el de potencia constante.

Al igual que en el modelo exponencial, el factor de dependencia a la frecuencia suele ser ignorado por la asunción de que la frecuencia la barra es invariable, por lo que las expresiones de (1.15) y (1.16) se convierten en:

$$P = P_0 [P_p + I_p(\bar{V})^1 + Z_p(\bar{V})^2] \quad (1.17)$$

$$Q = Q_0 [P_q + I_q(\bar{V})^1 + Z_q(\bar{V})^2] \quad (1.18)$$

Para este modelo, los coeficientes Z, I y P deben estar sujetos a las siguientes restricciones:

$$Z + I + P = 1 \quad (1.19)$$

$$0 \leq Z, I, P \leq 1 \quad (1.20)$$

Sin embargo, de acuerdo con [2] existe una discordancia en usar o no la restricción de la expresión (1.20), pues en diferentes literaturas, se puede encontrar variantes que tomen en o no consideración, nombrando así, al que no usa la restricción (1.20) como el modelo exacto y a la que sí como modelo lógico. En este trabajo se revisarán ambos modelos, tanto el lógico como el exacto.

1.3.3.3. Modelo Lineal de la Carga

En estudios en donde el voltaje varía dentro de un rango estrecho es recomendable modelar la carga siguiendo las expresiones (1.21) y (1.22) como se indica en [10].

$$P = P_0[a_0 + a_1(\bar{V})^1] \quad (1.21)$$

$$Q = Q_0[b_0 + b_1(\bar{V})^1] \quad (1.22)$$

Sujeto a las condiciones:

$$a_0 + a_1 = 1 \quad (1.23)$$

$$0 \leq a_0, a_1 \leq 1 \quad (1.24)$$

1.3.4. METODOS DE MODELADO

El modelado de carga se clasifica según el procedimiento con el que se obtiene los parámetros para la representación matemática, estos son el método basado en Componentes y el método basado en Mediciones de Campo.

1.3.4.1. Basado en Componentes

La aproximación del modelo de carga basada en componentes requiere los siguientes datos:

- Modelos individuales de los componentes
- Ubicación del componente y su composición
- Clase de composición (Porcentaje de contribución de cada carga)

Determinar la carga de esta manera es una tarea muy complicada debido a la cantidad de componentes que puede tener una carga, como se indica en la Figura 1.1, y en la mayoría de los casos es imposible obtener información detallada de los componentes eléctricos usados en los sistemas de potencia, pues en muchas ocasiones, la composición de estas puede terminar siendo afectada por las distintas condiciones climáticas y geográficas [11].

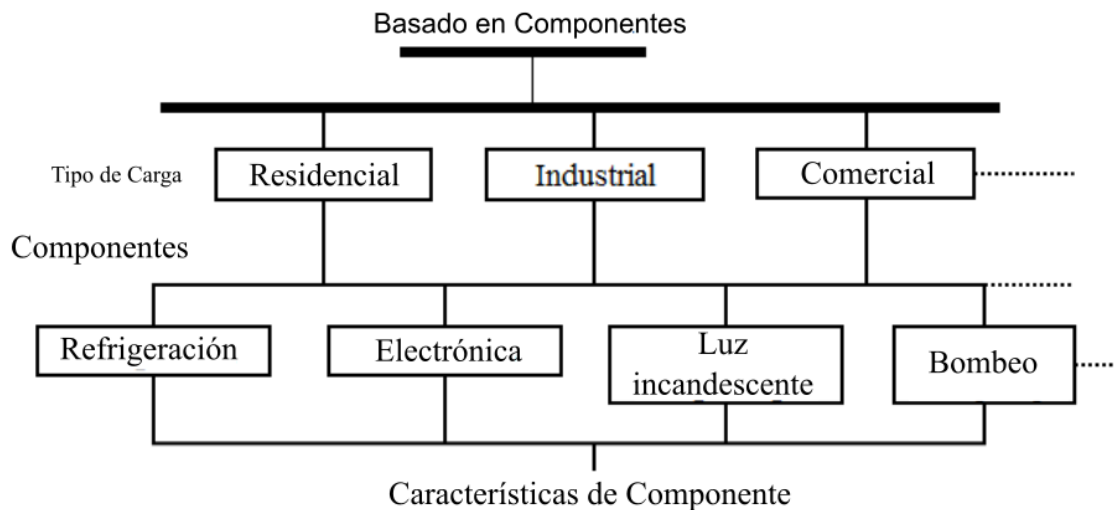


Figura 1.1 Modelado basado en componentes [11].

1.3.4.2. Basado en Mediciones

Este método de modelado de cargas requiere obtener datos mediante la medición de voltajes, potencias y en algunos casos frecuencia en un punto de la red, estos datos son procesados para ser ajustados un modelo de carga polinomial, exponencial u otros mediante la estimación de parámetros y su respectiva validación [11]. En la Figura 1.2, se puede apreciar un flujograma del procedimiento a seguir para realizar un modelo de carga basado en mediciones.

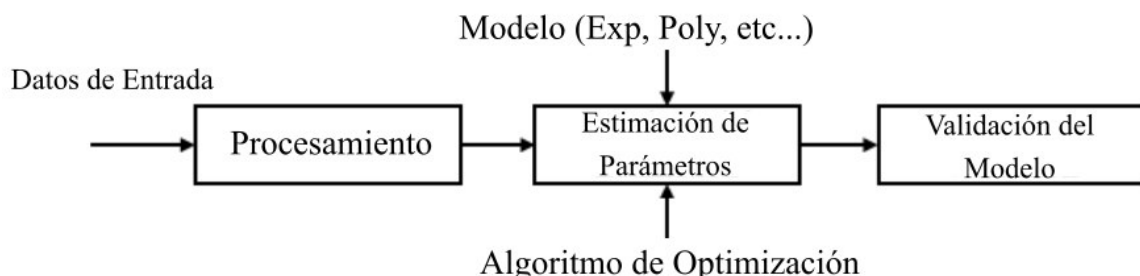


Figura 1.2 Modelo basado en mediciones [11].

En este trabajo ha utilizado este modelado, debido a que permite usar valores registrados por equipos de la red o por mediciones realizadas en el campo.

1.3.5. REGRESIÓN Y MODELADO

La regresión es una técnica para la investigación y modelación de la relación entre dos variables, dicho análisis juega un rol importante en la interpretación de datos experimentales como estadísticos y su correlación con modelos matemáticos implicando la determinación de una función $f(x)$ que “mejor se ajuste” a un conjunto de datos obtenidos experimentalmente. La función $f(x)$ puede ser lineal, polinomial, no lineal, exponencial o una combinación de funciones conocidas [12], [13].

1.3.5.1. El Método de los Mínimos Cuadrados

Es un método estandarizado en el análisis por regresión para aproximar una solución mediante la minimización de la suma de los cuadrados de los residuos y proveer así de “el mejor ajuste” para un conjunto de n pares de datos (x_i, y_i) en donde x_i es la variable independiente y y_i la variable dependiente cuyos valores se obtienen a partir de las mediciones realizadas. Siendo la función modelo dada por $f(x, \beta)$ con m parámetros ajustables contenidos en un vector β , el objetivo es encontrar los parámetros que “mejor” se ajusten a los datos. La diferencia entre el valor real de la variable dependiente y el valor precedido será la medida del ajuste del modelo:

$$r_i = y_i - f(x, \beta) \quad (1.25)$$

Se puede encontrar los valores óptimos de los parámetros al minimizar la suma de los residuos cuadrados [14].

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (1.26)$$

1.3.5.2. Regresión Lineal

Para la regresión lineal, se asume que los datos obtenidos encajarían con una función lineal del tipo:

$$f(x) = C_1 + C_2 x \quad (1.27)$$

En donde los coeficientes C_1 y C_2 serán determinados a partir de los datos obtenidos en la medición y en donde la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$E(C_1, C_2) = S = |y_1 - (C_1 + C_2 x_1)|^2 + |y_2 - (C_1 + C_2 x_2)|^2 + \dots + |y_n - (C_1 + C_2 x_n)|^2 \quad (1.28)$$

Para obtener el valor mínimo de S , se deriva con respecto a las variables C_1 e C_2 igualados a cero.

$$0 = \frac{\partial S}{\partial C_1} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - (C_1 + C_2 x_i))(-1) \quad (1.29)$$

Al aplicar una simplificación y la regla de distribución sobre la suma:

$$0 = \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n C_1 - \sum_{i=1}^n C_2 x_i \quad (1.30)$$

Y reordenando se obtiene la expresión:

$$n C_1 + \sum_{i=1}^n x_i C_2 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1.31)$$

Para la variable C_2 :

$$0 = \frac{\partial S}{\partial C_2} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - (C_1 + C_2 x_i))(-x_i) \quad (1.32)$$

Al aplicar una simplificación y la regla de distribución sobre la suma:

$$0 = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i C_1 - \sum_{i=1}^n C_2 x_i^2 \quad (1.33)$$

Y reordenando se obtiene la expresión:

$$\sum_{i=1}^n x_i C_1 + \sum_{i=1}^n x_i^2 C_2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (1.34)$$

Las expresiones de las derivadas parciales, en su forma matricial serían:

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{pmatrix} \quad (1.35)$$

1.3.5.3. Regresión de una Función Exponencial

Este tipo de regresiones suele ser muy frecuente y está dado por la forma de la ecuación:

$$y(x) = ax^b \quad (1.36)$$

La expresión (1.36) coincide con la expresión del modelo exponencial de la carga presentado en el punto 1.3.3.1 por lo que para obtener el error residual la expresión será:

$$E(a,b) = S = \sum_{j=1}^n (y_j - ax_j^b)^2 \quad (1.37)$$

La ecuación (1.36) puede reescribirse de manera linealizada si se usa aplica el logaritmo en ambos lados de las ecuaciones:

$$\ln y = \ln a + bx \quad (1.38)$$

Que a su vez puede escribirse como:

$$Y = A + BX \quad (1.39)$$

Siendo $A = \ln a, B = b, X = x$ y $Y = \ln y$ y simplificando el problema a uno de regresión lineal donde la expresión del residuo será:

$$E(A, B) = S = \sum_{j=1}^n (Y_j - (A + BX_j))^2 \quad (1.40)$$

La resolución de este sistema es idéntica al de la regresión lineal vista en el punto 1.3.5.2, por lo que el sistema de ecuaciones resultante es:

$$nA + B \sum_{j=1}^n X_j = \sum_{j=1}^n Y_j \quad (1.41)$$

$$A \sum_{j=1}^n X_j + B \sum_{j=1}^n X_j^2 = \sum_{j=1}^n X_j Y_j$$

Cuyo conjunto de resultados (A, B) debe ser transformado a $(x_j, \ln y_j)$ para determinar los valores desconocidos de a y b de la expresión original. Estos valores pueden ser deducidos de la siguiente formula:

$$a = e^A \quad y \quad b = B \quad (1.42)$$

1.3.5.4. Regresión Polinomial

En muchos casos, los datos que se obtienen a partir de mediciones no se comportan de manera lineal, si no como una función polinomial de grado n que se describe como [15]:

$$p_n(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n \quad (1.43)$$

S toma la forma de:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j=1}^m (y_j - p_n(x_j))^2 \\ &= \sum_{j=1}^m y_j^2 - 2 \sum_{j=1}^m p_n(x_j) y_j + \sum_{j=1}^m p_n(x_j)^2 \\ &= \sum_{j=1}^m y_j^2 - 2 \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=0}^n b_i x_j^i \right) y_j + \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=0}^n b_i x_j^i \right)^2 \\ &= \sum_{j=1}^m y_j^2 - 2 \sum_{i=0}^n b_i \left(\sum_{j=1}^m y_j x_j^i \right) + \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n b_i b_k \left(\sum_{j=1}^m x_j^{i+k} \right) \end{aligned} \quad (1.44)$$

Para minimizar S , es necesario que $\frac{\partial S}{\partial b_i} = 0$, para cada $i = 0, 1, 2, \dots, n$, entonces:

$$0 = \frac{\partial S}{\partial b_i} = -2 \sum_{j=1}^m y_j x_j^i + 2 \sum_{k=0}^n b_k \sum_{j=1}^m x_j^{i+k} \quad (1.45)$$

Dándonos así $n + 1$ ecuaciones normales para los $n + 1$ "b" desconocidos

$$\sum_{k=0}^n b_k \sum_{j=1}^m x_j^{i+k} = \sum_{j=1}^m y_j x_j^i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1.46)$$

Generalizando un sistema de ecuaciones, este seguirá la forma:

$$\begin{aligned} b_0 \sum_{j=1}^m x_j^0 + b_1 \sum_{j=1}^m x_j^1 + b_2 \sum_{j=1}^m x_j^2 + \dots + b_n \sum_{j=1}^m x_j^n &= \sum_{j=1}^m y_j x_j^0 \\ b_0 \sum_{j=1}^m x_j^1 + b_1 \sum_{j=1}^m x_j^2 + b_2 \sum_{j=1}^m x_j^3 + \dots + b_n \sum_{j=1}^m x_j^{n+1} &= \sum_{j=1}^m y_j x_j^1 \\ &\vdots \\ b_0 \sum_{j=1}^m x_j^n + b_1 \sum_{j=1}^m x_j^{n+1} + b_2 \sum_{j=1}^m x_j^{n+2} + \dots + b_n \sum_{j=1}^m x_j^{2n} &= \sum_{j=1}^m y_j x_j^n \end{aligned} \quad (1.47)$$

1.3.5.5. Multiplicadores de LaGrange

En problemas de optimización, los multiplicadores de Lagrange son usados para encontrar los máximos o mínimos de una función sujeta a restricciones de igualdad. La idea principal de los multiplicadores de LaGrange es convertir un problema con restricciones en uno de forma que la evaluación derivativa de un problema sin restricciones pueda seguir siendo aplicada.

La función lagrangiana es la relación entre el gradiente de la función y los gradientes de las restricciones lo cual lleva a la reformulación del problema original [16], [17].

Para obtener el máximo el mínimo de una función $f(x)$ sujeta a una restricción de igualdad $g(x) = 0$, la función del lagrangiana tendrá la forma:

$$\zeta(x, \lambda) = f(x) - \lambda g(x) \quad (1.48)$$

1.3.5.6. Condiciones de Karush Kuhn Tucker

En problemas de optimización es común encontrar problemas que estén sujetos a restricciones de igualdades, los cuales pueden ser resueltos mediante el uso de la función Lagrangiana, sin embargo, existe una gran cantidad de problemas que deben estar sujetos a condiciones de desigualdad del tipo $h(x) \leq 0$.

Las condiciones de Karush Kuhn Tucker son una generalización del método de los multiplicadores de Lagrange permitiendo agregar restricciones de desigualdad [18]. Una

que una función $f(x)$ sujeta a condiciones de igualdad del tipo $g(x) = 0$ y que además este sujeta a condiciones de desigualdad del tipo $h(x) \leq 0$ tendrá una función lagrangiana como se indica en la ecuación (1.49).

$$\zeta(x, \lambda) = f(x) - \lambda g(x) - \mu h(x) \quad (1.49)$$

Siendo esta expresión la que se debe optimizar.

1.3.5.7. Restricciones de Desigualdad Bilaterales

En muchos problemas de optimización se pueden encontrar restricciones del tipo:

$$\alpha \leq f(x) \leq \beta \quad (1.50)$$

Cada lado de la restricción puede ser separado en dos restricciones unilaterales:

$$f(x) \leq \beta \quad (1.51)$$

$$-f(x) \leq -\alpha \quad (1.52)$$

Implicando el uso de dos multiplicadores por cada restricción de desigualdad bilateral [17]. Para una función en donde se tiene restricciones de igualdad, desigualdad y bilaterales, la expresión lagrangiana sería:

$$\zeta(x, \lambda) = f(x) - \lambda g(x) - \mu h(x) - \mu' h(x) - \mu'' h(x) \quad (1.53)$$

1.3.6. MEDIDAS PARA EL DESEMPEÑO DEL MODELO

Cuando se realiza un modelado a partir de datos de mediciones es importante determinar cuan bueno es el modelo predictivo. Las medidas del desempeño del modelo tienen múltiples aplicaciones en las que se incluye [19]:

- Evaluación del modelo: para determinar qué tan bueno o confiable es el modelo obtenido.
- Comparación de modelos: entre dos o más modelos y seleccionar el mejor.
- Comparaciones fuera de muestra y fuera de tiempo: para verificar el desempeño de un modelo cuando se le aplican nuevos datos y evaluar si su desempeño no ha empeorado.

En función de la naturaleza de la variable dependiente, ya sea esta continua, binaria, categórica, etc., se deben aplicar medidas de desempeño diferentes. En esta sección solo se mencionarán algunas de las medidas más usadas para evaluar el desempeño

de modelos prestando una atención especial al error medio absoluto, pues en [20] se demuestra que este indicador tiene menos perturbaciones o discrepancias en comparación con el error cuadrático medio, por lo que para la evaluación a realizarse, este sería el indicador por excelencia, sin embargo, el desempeño de los modelos será expresado por el MSE como por el RMSE.

1.3.6.1. Error Residual

Este indicador muestra la diferencia entre los valores que el modelo predice y los valores reales tomados a partir de mediciones [21]:

$$error = y - \hat{y} \quad (1.54)$$

En donde:

y : valores reales

\hat{y} : valor estimado

1.3.6.2. Error Cuadrático Medio – MSE

El error cuadrático medio, MSE por sus siglas en inglés, es la forma más popular de evaluar el desempeño de un modelo el cual mide el promedio de los cuadrados de los errores residuales, es decir el cuadrado de la diferencia entre el valor estimado y el valor real [22].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1.55)$$

En donde:

Y : valores reales

\hat{Y} : valor estimado

n : número de muestras

1.3.6.3. Media Cuadrática – RMSE

Es una de las métricas más usadas para medir las diferencias entre los valores predichos por un modelo y los valores reales. El RMSE es la raíz cuadrada del MSE, el cual tiene un efecto proporcional sobre el RMSE por lo que el error cuadrático medio resulta ser sensible a valores atípicos [23].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_j)^2} \quad (1.56)$$

En donde:

Y : valores reales

\hat{Y} : valor estimado

n : número de muestras

1.3.6.4. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2) o “R cuadrado”, es la proporción en la variación en la variable dependiente que es predecible o calculable a partir de la variable independiente [24]. La definición generalizada del coeficiente de determinación está dada por la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1.57)$$

En donde:

Y : valores reales

\hat{Y} : valor estimado

\bar{Y} : promedio de los valores medidos

Mientras el valor del coeficiente de determinación sea lo más cercano a 1, indica que el modelo es más preciso, sin embargo esta indicador puede tomar valores negativos cuando el modelo es muy lejano de ser el adecuado [25], [26].

1.3.7. PYTHON

Python es un lenguaje de programación orientado a objetos de alto nivel cuya filosofía de diseño hace énfasis en la legibilidad del código, lo cual permite a los programadores escribir código lógico y pequeño para proyectos de gran escala [27] y para múltiples plataformas, ya que está disponible para los sistemas operativos Windows, Mac y Linux.

La gran acogida que este lenguaje de programación ha recibido en los últimos años es gracias a la gran cantidad de librerías, paquetes y módulos que se encuentran disponibles, además de que generalmente el licenciamiento de estos es de uso libre.

En este proyecto se usarán los módulos Scipy, Matplotlib y Numpy para obtener los parámetros de los modelos mediante la aproximación de mínimos cuadrados.

1.3.7.1. Scipy

Es un conjunto de librerías de código abierto para Python, especializadas en computo científico compuesta por herramientas y algoritmos matemáticos para: optimización, algebra lineal, integración, funciones especiales, interpolación, procesamiento de señales entre otras [28], [29].

Esta librería tiene como optimizador el método de programación cuadrática secuencial, según [30] es uno de los métodos más eficientes para resolver problemas no lineales del tipo:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{sujeto a} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \geq 0 \\ & a \leq x \leq b \end{aligned} \tag{1.58}$$

Este optimizador se ajusta perfectamente a la expresión que se necesita para el modelado de cargas.

El licenciamiento de esta librería está sujeto al licenciamiento “BSD 3-Clause” la cual permite el uso comercial, modificación, distribución, uso privado libre de responsabilidad y de garantías [31].

1.3.7.2. Matplotlib

Matplotlib es una librería gratuita la cual es una extensión para NumPy que provee de una API para generar gráficas a partir de datos, como se indica en la Figura 1.3, contenidos en una lista o en un arreglo y que está diseñada para ser similar a MATLAB [32].

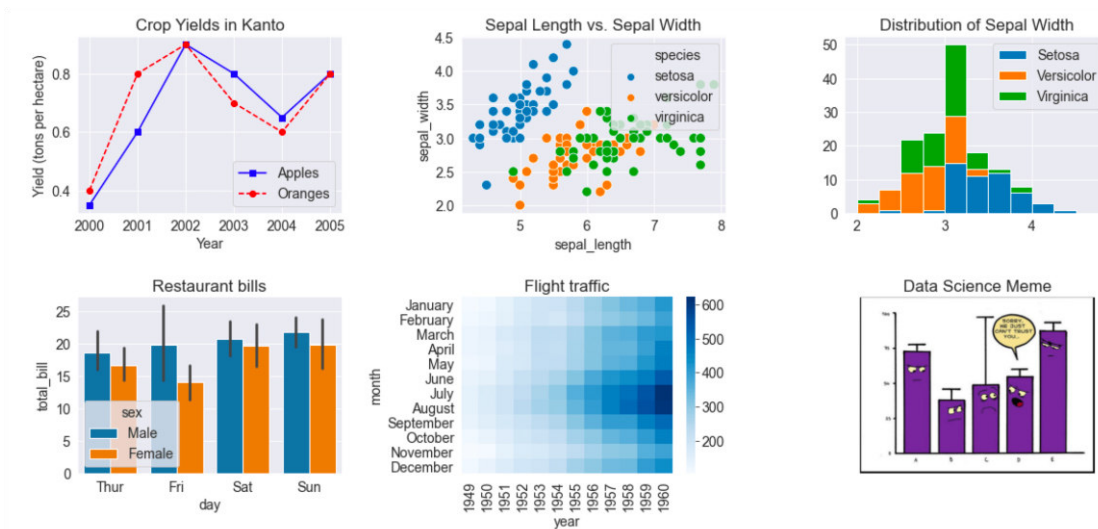


Figura 1.3 Ejemplo de gráficas en Matplotlib.

El licenciamiento de esta librería especifica que el equipo de MATPLOTLIB “otorga una licencia mundial no exclusiva, libre de regalías para reproducir, analizar, probar, realizar y/o exhibir públicamente, preparar trabajos derivados” [33], etc.

1.3.7.3. Numpy

Es una librería para el lenguaje de programación Python que añade el soporte para arreglos de datos multidimensionales y extensos en conjunto con una colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con dichos arreglos [34].

En el acuerdo de licencia específica que este módulo está sujeto al licenciamiento “BSD 3-Clause” que permite su uso de forma libre.

1.3.7.4. Pyqt5

Pyqt es una interfaz para la caja de herramientas multiplataforma de Qt implementada en el lenguaje de programación Python como una extensión de software libre para la creación de interfaces gráficas similares a las que se muestra a continuación [35].

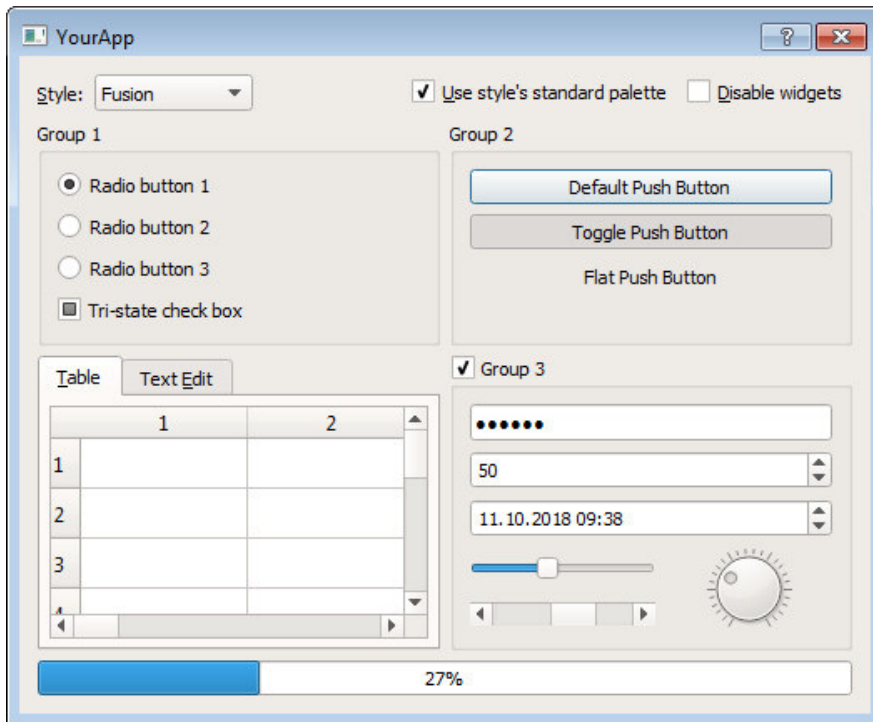


Figura 1.4 Ejemplo de interfaz en PyQt5 [36].

Esta librería está sujeta al licenciamiento GNU GPL v3 que garantiza la libertad de uso y ejecución [37], [38], es ideal para el desarrollo de este proyecto.

1.3.7.5. Pandas

Es un paquete considerado el núcleo del análisis de datos en Python pues provee estructuras de datos como lo es el DataFrame (arreglo tabulado de datos de dos dimensiones con filas y columnas etiquetadas) que se indica en la Figura 1.5 y funciones especializadas que permitan el trabajo con los datos de forma más fácil rápida y efectiva. [29], [39].

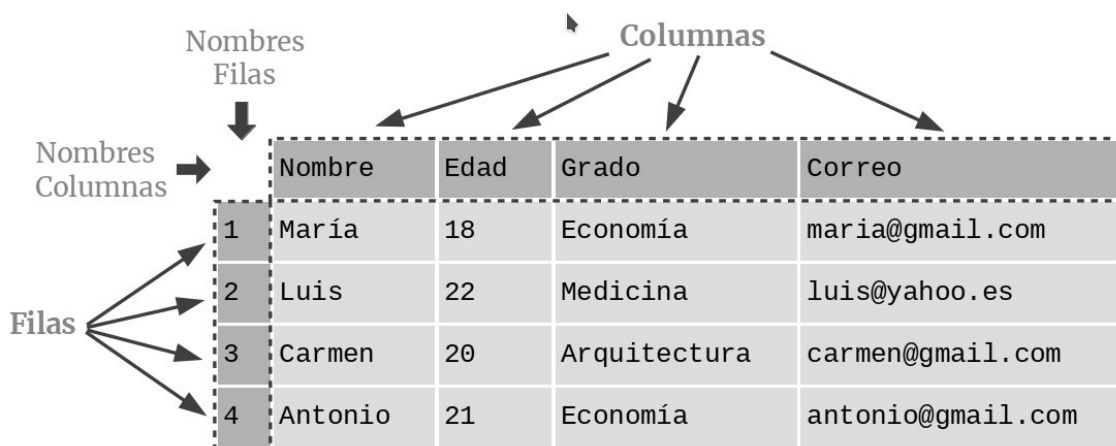


Figura 1.5 Dataframe de la librería Pandas [40].

Usando esta librería se puede leer archivos de vectores separados por coma y archivos de Microsoft Excel. Esta librería también es distribuida bajo el licenciamiento “BSD 3-Clause” [41].

1.3.7.6. Modularización

Cuando el código de un programa va a ser reutilizado en uno o varios procesos, es común dividir los procesos repetitivos en una función independiente del programa que pueda ser reutilizada cuantas veces sea necesaria optimizando así el código principal o por programas diferentes al código.

1.3.8. VALORES SEPARADOS POR COMA (CSV)

Los archivos con datos separados por coma, conocidos como archivos CSV, usan la coma para separar los valores tabulados de un conjunto de datos. A pesar de no estar estandarizado es ampliamente usado en el intercambio de datos para consumidores, negocios y aplicaciones científicas [42].

En un archivo CSV una tabla se representa de la siguiente forma:

Tabla 1.1 Tabla de ejemplo.

Año	Fabricante	Modelo	Descripcion	Precio
1999	Chevy	Venture		5900
1999	Chevy	Venture		6000
1996	Jeep	Grand Cherokee	Debe Venderse	1233

La tabla Tabla 1.1 en formato CSV será:

```
Año,Fabricante,Modelo,Descripcion,Precio
1999,Chevy,"Venture ","",5900.00
1999,Chevy,"Venture ","",6000.00
1996,Jeep,Grand Cherokee,"Debe Venderse!",1233
```

En algunas variantes europeas se usa el punto y coma en lugar de los dos puntos.

1.3.9. FILTRO SAVITZKY–GOLAY (SAVGOL)

Abraham Savitzky y Marcel Golay mientras analizaban datos obtenidos de dispositivos digitales, propusieron un método numérico con el objetivo de mantener la tendencia y precisión de los datos, pero de una forma suavizada.

El proceso de suavizado se realiza a través de un ajuste sucesivo de subconjuntos de datos adyacentes a un polinomio de orden bajo a través del proceso conocido como convolución.

El problema general se describe como el ajuste de una curva a un subconjunto de datos de $2m + 1$ valores consecutivos, estos son usados para el ajuste de curvas mediante el método de los mínimos cuadrados polinomiales de grado n (donde n es menor que $2m + 1$) [43].

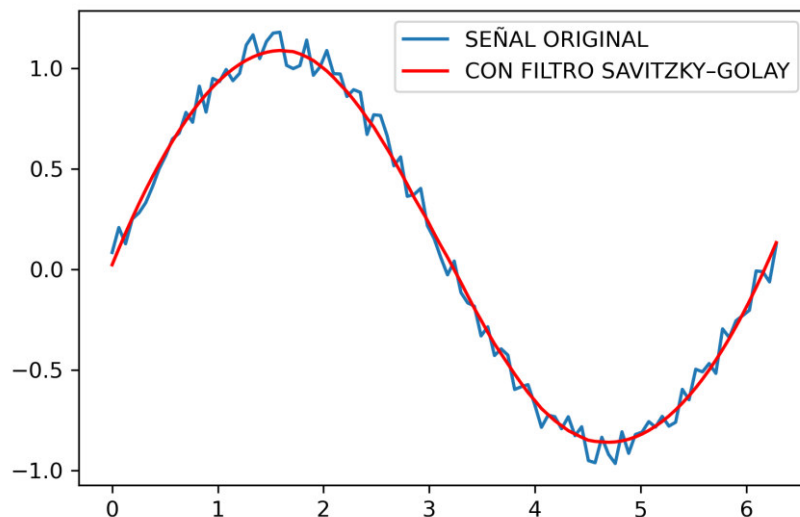


Figura 1.6 Ejemplo de señal con filtro y sin filtro Savgol [44].

1.3.10. CONVERSIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO

Los equipos registradores guardan la información de los eventos de forma discreta y no análoga, es decir que en un período de tiempo toman un número determinado de muestras y luego estas son usadas para reconstruir el evento, el cambio de la frecuencia con la que estas muestras son tomadas se conoce como conversión de la frecuencia de muestreo. En este trabajo se considera el submuestreo o “downsampling” de los datos tomados por un registrador.

1.3.10.1. Submuestreo

Consiste en reducir la frecuencia de muestro [45], es decir que una señal $s[n]$ puede ser rebajada por un factor entero Q manteniendo cada Q ésima muestra eliminando las

muestras restantes resultando en una nueva muestra cuya velocidad de muestreo sea $1/Q$ veces la velocidad del muestreo original. En la Figura 1.7 se muestra un ejemplo en el dominio del tiempo de un submuestreo del tipo 3 a 1.

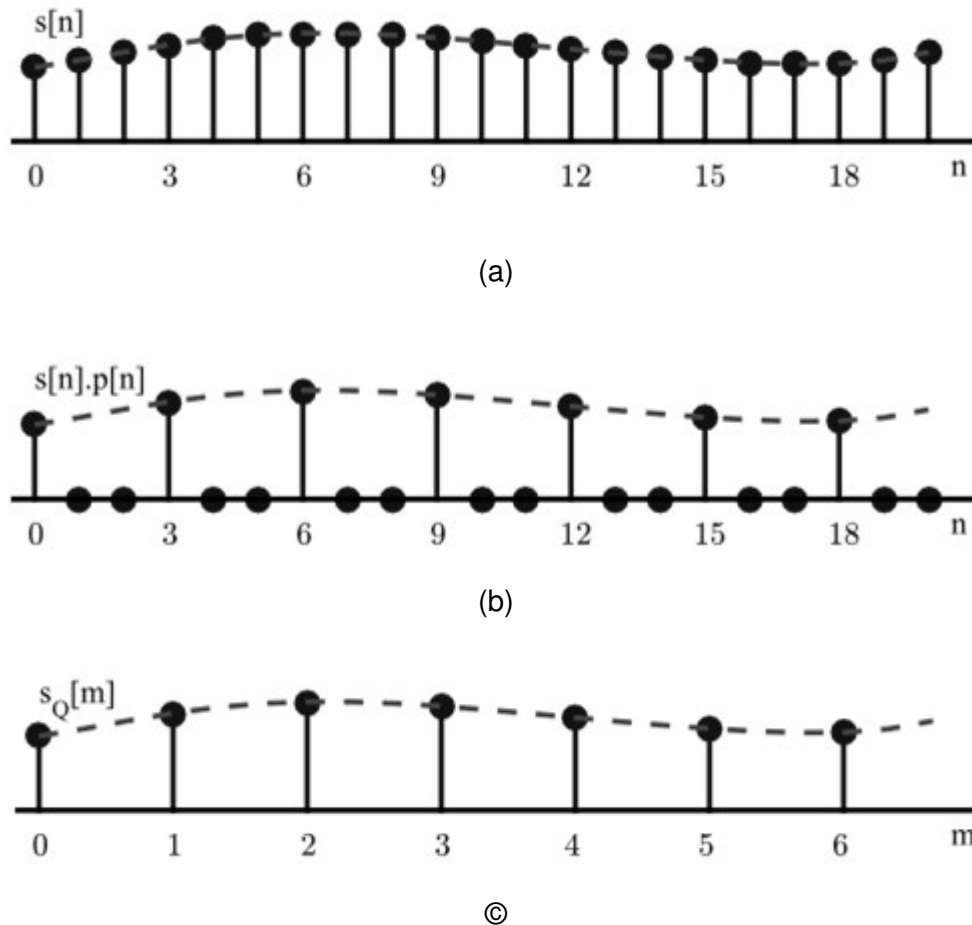


Figura 1.7(a) Señal original (b) Selección de muestras a eliminar (c) Señal resultante [46].

El procedimiento del submuestreo puede imaginarse como la multiplicación de la señal $s[n]$ con una secuencia de muestreo $p[n]$ con período Q llenando los espacios intermedios con cero, sin embargo, computacionalmente estos espacios no son convertidos a cero, en su lugar son descartados de la señal dando como resultado $s[m]$. Otra forma de lograr este efecto de manera computacional es la de seleccionar de forma manual las muestras mediante un algoritmo que realice una iteración sobre los datos.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las características del equipo registrador usado en este proyecto, así como las características de la herramienta computacional elaborada y adecuaciones realizadas a las ecuaciones de los modelos de carga para facilitar el cálculo de los coeficientes.

Un punto importante en el desarrollo de la herramienta computacional es el factor de reusabilidad de esta, cuya finalidad es ser usada con equipos registradores de otros fabricantes o mediciones tomadas de formas alternativas a la usada en este proyecto.

2.1. ADECUACIÓN DEL MODELO POLINOMIAL O ZIP DE LA CARGA

La expresión polinomial de la carga dada en el punto 1.3.3.2 puede simplificarse para así obtener una expresión similar a la del punto 1.3.5.4 para la regresión polinomial, para ello se divide a ambos lados de la ecuación para P_0 obteniendo así la expresión en por unidad con coeficientes Z, I y P. Del mismo modo, \bar{V} será el voltaje en por unidad tomando como base V_0 .

$$\frac{P}{P_0} = P_p + I_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^1 + Z_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = P_p + I_p (\bar{V})^1 + Z_p (\bar{V})^2 \quad (2.1)$$

$$P_{p,u}(\bar{V}) = b_0 + b_1 \bar{V} + b_2 \bar{V}^2 \quad (2.2)$$

En donde P_0 y V_0 , además de ser los valores en los que el estudio se inicia, serán usados como la potencia y el voltaje de referencia. Adicionalmente se simplifica la notación reemplazando los coeficientes Z, I y P por b con sus respectivos subíndices.

Analógicamente, la expresión que define la potencia reactiva será:

$$Q_{p,u}(\bar{V}) = b_3 + b_4 \bar{V} + b_5 \bar{V}^2 \quad (2.3)$$

Las ecuaciones de error a minimizar son entonces:

$$E_P = \sum_{j=1}^m (P_{j,medido} - P_{j,p,u}(\bar{V}))^2 \quad (2.4)$$
$$E_Q = \sum_{j=1}^m (Q_{j,medido} - Q_{j,p,u}(\bar{V}))^2$$

A las ecuaciones (2.2) y (2.3) se aplica las restricciones (1.19) y (1.20) para obtener el modelo de carga lógico y solamente la restricción (1.19) para obtener el modelo exacto.

2.2. ADECUACIÓN DEL MODELO EXPONENCIAL

La ecuación (1.12), que describe el modelo exponencial de la carga, es idéntica a la ecuación (1.36) la cual es propuesta para la regresión de una función exponencial como se puede observar en la ecuación (2.5):

$$P = P_0(\bar{V})^a = a \cdot x^b \quad (2.5)$$

Sin embargo, el coeficiente “a” ya es un dato conocido pues resulta en la Potencia inicial del periodo evaluado. Al dividir ambos lados de la ecuación para P_0 tomando P_0 como la potencia base y \bar{V} será el voltaje en por unidad tomando como base V_0 se obtiene la ecuación (2.6):

$$P_{p.u}(\bar{V}) = \frac{P}{P_0} = (\bar{V})^a \quad (2.6)$$

La función de error a minimizar será la misma que la ecuación (2.4).

2.3. ADECUACIÓN DEL MODELO LINEAL

Para el modelo lineal de la carga cuyas ecuaciones son la (1.21) y (1.22), la simplificación de estas es análoga a la presentada en el punto 2.1, resultando en las expresiones:

$$P_{p.u}(\bar{V}) = b_0 + b_1\bar{V} \quad (2.7)$$

$$Q_{p.u}(\bar{V}) = b_2 + b_3\bar{V} \quad (2.8)$$

Estas están sujetas a las restricciones (1.23) y (1.24) que se mencionan en el punto 1.3.3.3 en donde la función de error a minimizar también será la misma que la ecuación (2.4).

2.4. ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el modelado de carga basado en mediciones se requieren los datos de: voltaje RMS, potencia activa y potencia reactiva. Para obtener estos datos se conecta el equipo registrador a las líneas de la bahía de carga a través de su respectivo TP y TC.

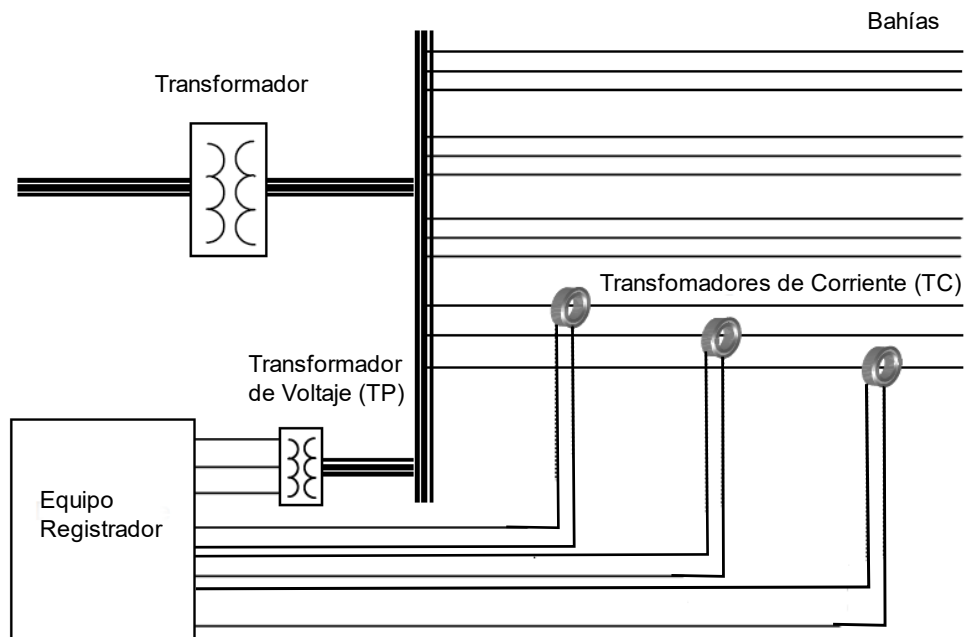


Figura 2.1 Ilustración de una subestación y esquema de conexión del equipo registrador [11].

De esta forma el equipo registrador puede tomar lectura de los datos de forma segura.

2.5. AJUSTE DE ESCALA AMTEK TR-300

En el equipo AMTEK TR-3000 es necesario ajustar los parámetros de los canales analógicos dependiendo de los distintos niveles de voltaje al cual se conecte. El parámetro "FULL SCALE" el cual permite una adecuada conversión de los valores para el registrador. Este valor debe ajustarse en la sección de "Input Channel" en la configuración del registrador como se indica en la Figura 2.2 y conforme a las ecuaciones (2.9), (2.10), (2.11) y (2.12) según sea el caso [47].

Analogue Channel Parameters					
Channel Name:	Fase A Corriente			Nominal:	0.600
Frequency:	None			Full Scale:	12.000
Channel Setup:	1.414	AC	Normal	Units:	kA
Turns Ratio:	1	:	1	Phase Correction:	0.0000 DEG

Figura 2.2 Configuración del Full Scale.

Para ajustar el "Full Scale" en los canales del Voltaje se usan la siguiente fórmula:

$$FullScale = \frac{VT_{primario} \times 212,13}{VT_{secundario}} \quad (2.9)$$

Para ajustar el "Full Scale" en los canales de Corriente se usa la fórmula:

$$FullScale = \frac{CT_{primario} \times 1,41412}{\frac{CT_{secundario}}{relaci3n \times burden}} \quad (2.10)$$

En el caso que el canal de corriente tenga conectado una resistencia shunt:

$$FullScale = \frac{CT_{primario} \times 20 \times ValorShunt}{CT_{secundario}} \quad (2.11)$$

Para corregir los pequeños errores de las relaciones de los transformadores, ganancias de amplificadores entre otras, se puede ajustar el valor del "Full Scale" mediante la siguiente fórmula:

$$FullScale = \frac{CT_{primario} \times 20 \times ValorShunt}{CT_{secundario}} \quad (2.12)$$

2.6. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL REGISTRADOR CON PYTHON

Una comunicaci3n directa entre el equipo registrador de AMTEK y la terminal de Python no es posible, por lo que para procesar los datos es necesario exportarlos usando el software Display Station 32 el cual es la interfaz entre el usuario y el equipo de AMTEK-tr3000. Entre los formatos en los que se puede exportar se encuentra el formato de valores separados por comas (CSV) mencionado en el punto 1.3.8 el cual puede ser leido por Python gracias a la librería pandas.

Una vez que el registrador tome las lecturas necesarias se procede de la siguiente forma:

- Usando el software Display Station 32, se recuperan datos capturados por el equipo registrador y se exporta en formato CSV.
- Se lee el archivo CSV y se realiza un preprocesamiento de los datos.
- El usuario ajusta ciertos parámetros para realizar el modelado y se calcula los coeficientes de los modelos

El intercambio de datos generalizado puede resumirse en la siguiente figura:

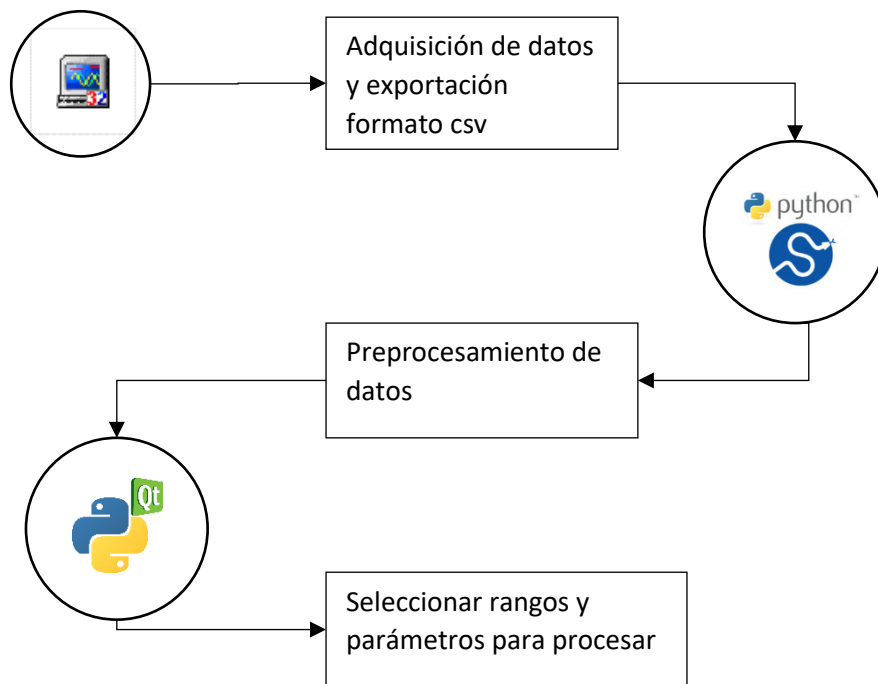


Figura 2.3 Proceso de extracción y procesamiento de datos.

Una guía para realizar esta extracción de datos se presenta en el Anexo B.

2.7. ALGORITMO GENERAL DEL PROGRAMA

La herramienta computacional sigue el flujo de trabajo que se indica en la Figura 2.4.

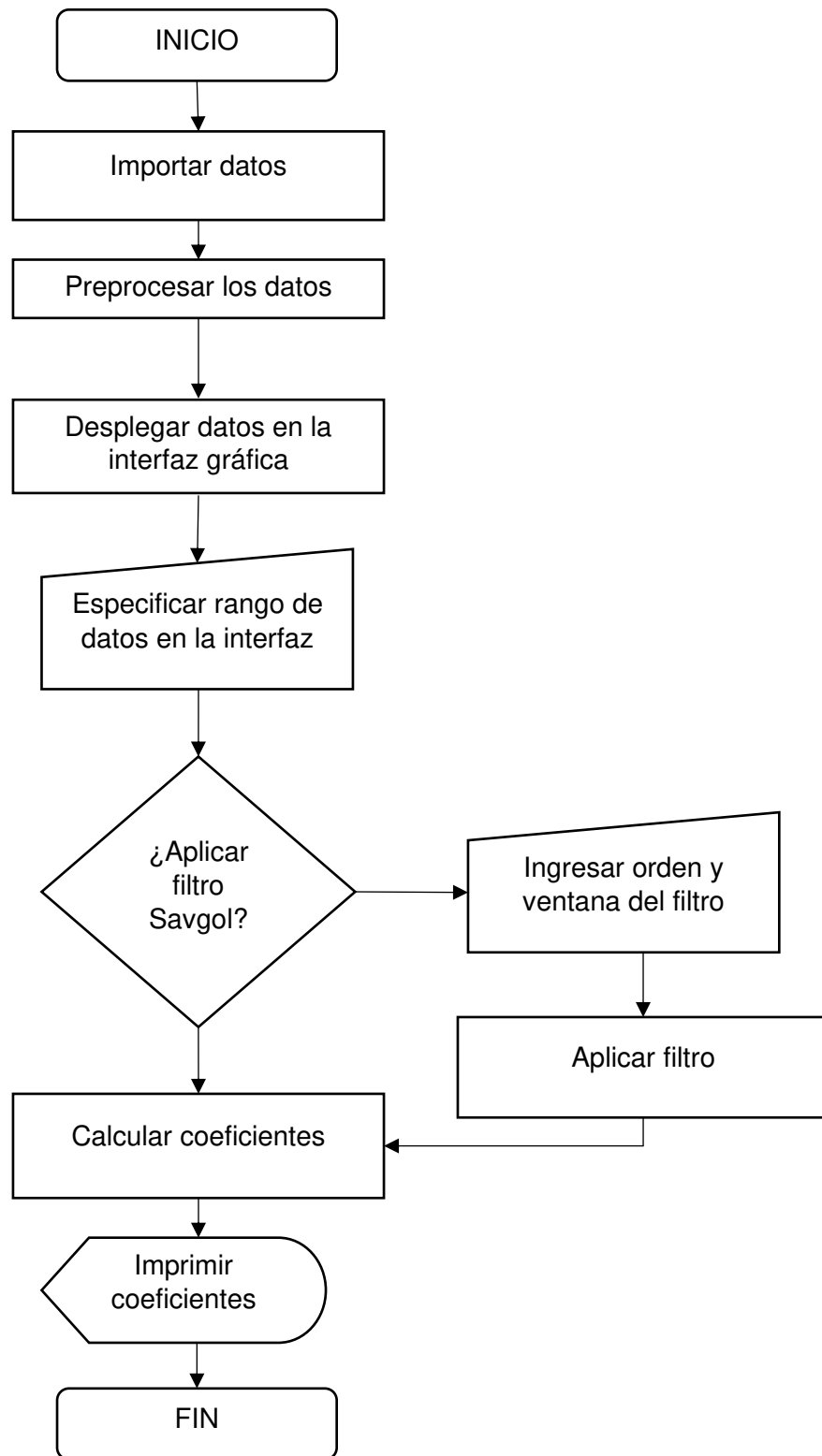


Figura 2.4 Diagrama de flujo de la herramienta computacional.

Como se indica en la Figura 2.4 la herramienta computacional inicia con la importación de los archivos que contiene los datos para posteriormente realizar un preprocesamiento de estos y mostrarlos en la interfaz gráfica.

Una vez que los datos sean desplegados, el usuario debe seleccionar el rango de inicio y fin de para especificar el intervalo de datos que será usado en el modelado de la carga además de seleccionar la aplicación del filtro Savgol en donde debe indicar el orden y ventana del filtro.

Finalmente, la herramienta ejecuta el algoritmo de optimización para calcular los coeficientes y presentarlos en la pantalla de resultados.

2.8. REUSABILIDAD

Esta herramienta se ha diseñado conforme a ciertas especificaciones que se puede obtener del registrador AMTEK, sin embargo, con el fin de fomentar la reusabilidad de dicha herramienta con equipos registradores de otros fabricantes, así como datos obtenidos de otras fuentes, se procede con la generación de una plantilla del tipo universal para el ingreso de datos.

Para generar la plantilla se usará la hoja de cálculo de Microsoft Excel, la cual consta con los campos de voltaje RMS y potencias activa (P) y reactiva (Q) con su respectiva marca temporal. La plantilla tendrá la siguiente forma:

Tabla 2.1 Plantilla de Excel para mediciones obtenidas de forma alternativa.

Tiempo	Voltaje Fase A RMS	Voltaje Fase B RMS	Voltaje Fase C RMS	Line group 1 Real Pwr A	Line group 1 React Pwr A	Line group 1 Real Pwr B	Line group 1 React Pwr B	Line group 1 Real Pwr C	Line group 1 React Pwr C

Al llenar la plantilla con los correspondientes datos, la herramienta computacional podrá realizar los cálculos respectivos para encontrar los coeficientes de los modelos de carga basándose en las mediciones.

2.9. SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRENAMIENTO Y DE PRUEBA

Los datos de entrenamiento y de prueba son subconjuntos de los datos obtenidos que son usados para entrenar un modelo y probar el mismo respectivamente. Estos subconjuntos son tomados a partir del total de datos obtenidos, por ejemplo de una medición, separándolos de tal forma que el subconjunto para probar el modelo debe ser lo suficientemente grande para producir resultados estadísticamente significativos [48].

Una separación ideal puede ser de 80% de los datos para el entrenamiento y 20% para la prueba del modelo.

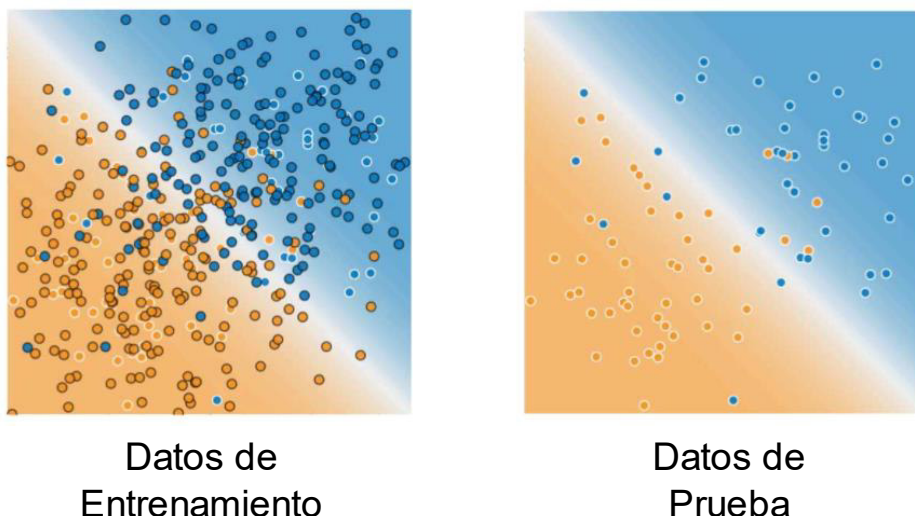


Figura 2.5 Representación de datos de entrenamiento V.S prueba [48].

Para que la comparación entre modelos no se vea afectada por la selección aleatoria de datos de entrenamiento y prueba se usarán los mismos datos en todos los modelos, de esa forma, la evaluación del desempeño de los modelos de carga será más precisa.

2.10. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

La herramienta computacional para el modelado de carga a partir de mediciones de campo se desarrolló en Python en usando los módulos SciPy, Matplotlib, Numpy y Pandas. La interfaz de usuario se desarrolló mediante el módulo PyQt5 junto con su aplicación “Designer”, la cual facilita el diseño de los elementos de la interfaz.

La interfaz gráfica consta de dos ventanas, una de saludo y la ventana principal como se observa en la Figura 2.6 y Figura 2.7.

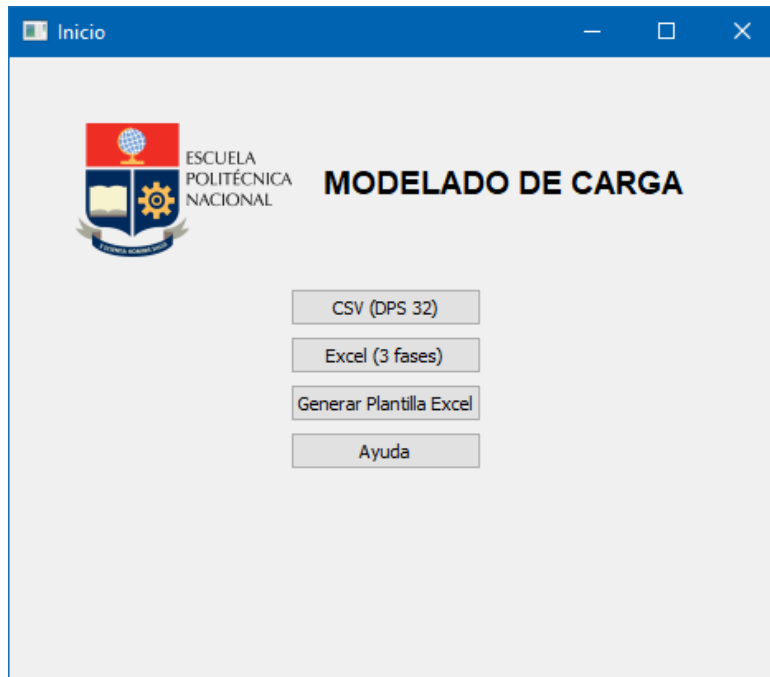


Figura 2.6 Ventana de inicio.

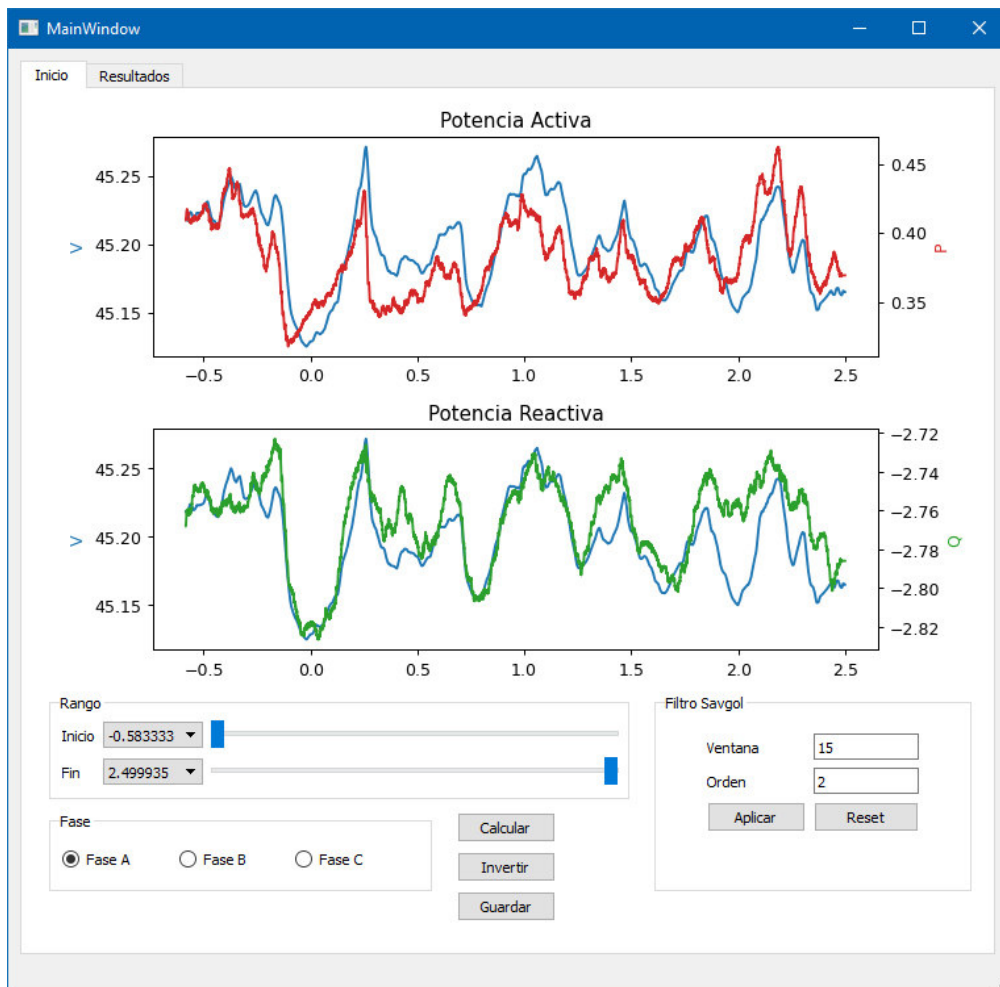


Figura 2.7 Ventana Principal.

Ambas ventanas cumplen con funciones específicas para el modelado de carga por lo que su funcionamiento se detalla a continuación.

2.10.1. VENTANA DE INICIO

En esta ventana se presentan 4 botones con las siguientes funciones:

- CSV (DPS 32): importar archivos que contengan los datos de las mediciones a partir del archivo CSV generado por el equipo registrador.
- Excel (3 fases): importa un archivo de Excel que contenga los datos de las mediciones de las 3 fases del sistema. Este archivo de Excel debe estar en el formato de una plantilla específica que se puede generar haciendo clic en el siguiente botón.
- Generar Plantilla Excel: genera un archivo de Excel con un formato tipo plantilla para usar con mediciones tomadas de formas alternativas o con registradores de otros fabricantes.
- Ayuda: Despliega un manual de usuario.

2.10.2. VENTANA PRINCIPAL

En esta ventana se despliegan los datos importados de forma gráfica, permite además varias opciones al usuario. Esta ventana está dividida en 2 pestañas, siendo la segunda pestaña en donde se mostrará los resultados.

2.10.2.1. Selección de Rango de Datos

Entre las opciones está la de seleccionar el rango de datos en el cual se va a realizar el estudio. Esta opción resulta de utilidad cuando los datos obtenidos mediante la medición son muy extensos. Para seleccionar el rango de datos en el que se requiere realizar el estudio se puede usar la slider o la caja desplegable para seleccionar los rangos de inicio o fin como se ve en la Figura 2.8.

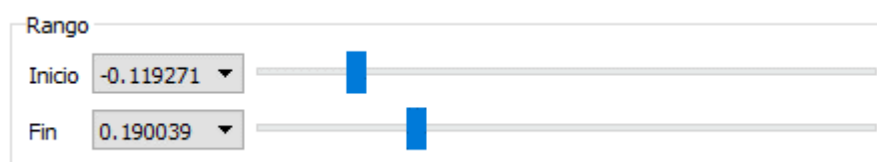
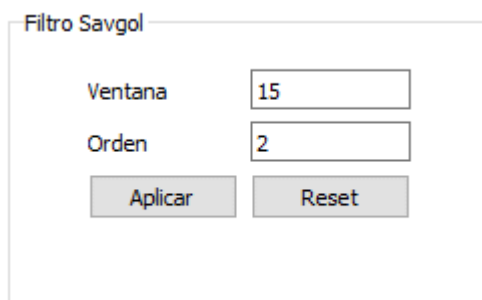


Figura 2.8 Selección de rangos.

La interfaz gráfica se actualizará de forma automática según las especificaciones del rango de inicio y fin.

2.10.2.2. Aplicación de Filtro SAVITZKY–GOLAY (Savgol)

La aplicación del filtro Savgol también está presente dentro de esta ventana cuyos parámetros de entrada son la ventana de datos con las que se desea aplicar el filtro y el orden del polinomio para ajustar el filtro como se indica en la Figura 2.9.



Filtro Savgol

Ventana

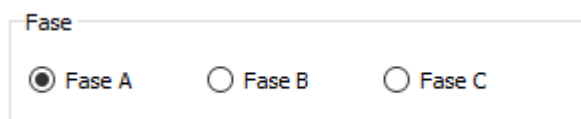
Orden

Figura 2.9 Campo para la aplicación filtro Savgol

Este filtro es usado en caso de que las lecturas tengan demasiado ruido provocado por armónicos además de tener la opción de ser removido en caso de que se desee aplicar otra configuración.

2.10.2.3. Selección de Fase

En esta sección se puede escoger entre cualquiera de las 3 fases para poder visualizar en la gráfica.



Fase

Fase A Fase B Fase C

Figura 2.10 Selección de fases

Nota: La selección del rango y del filtro Savgol se aplicarán para las 3 fases.

2.10.2.4. Invertir Señal

Cuando se realiza la conexión del equipo registrador existe la posibilidad de que se conecte de forma equivocada la pinza de corriente dando como resultado una señal invertida en las lecturas de las potencias. Para solucionar esto en la ventana principal se encuentra un botón de "Invertir" el cual desplegará una ventana tipo formulario en donde se puede seleccionar qué señales se desea invertir como se indica en la Figura 2.12.

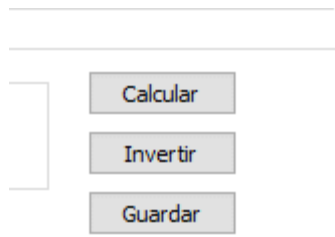


Figura 2.11 Botones de utilidad.

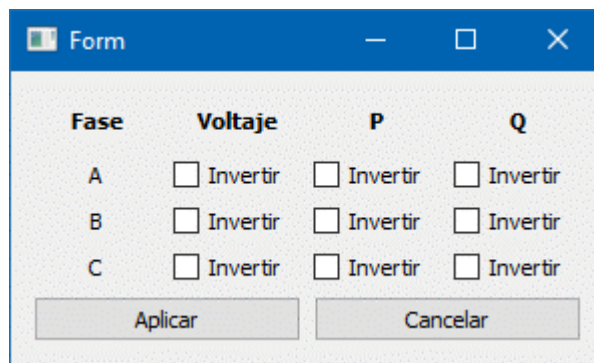


Figura 2.12 Ventana de inversión de señal.

Un ejemplo de su aplicación sería el tener una señal como se indica en la Figura 2.13.

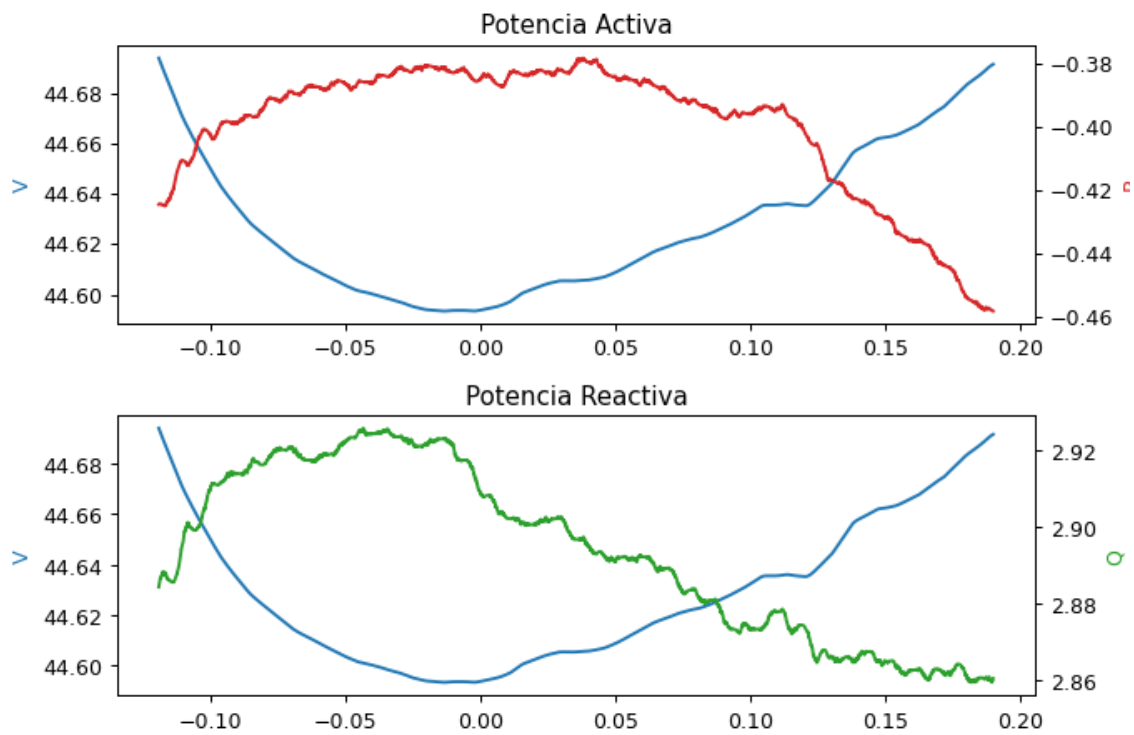


Figura 2.13 Señal de potencia invertida en fase C.

Al aplicarse la inversión en las señales de potencia activa y reactiva la señal se convierte en la que se puede observar en la Figura 2.14.

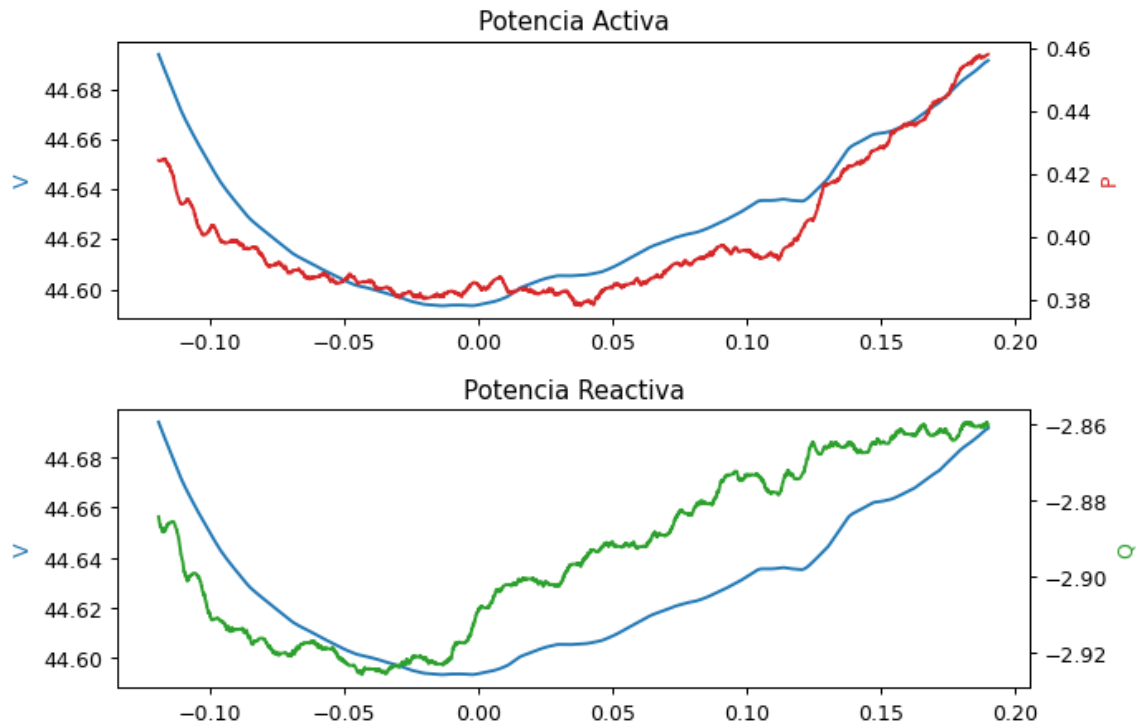


Figura 2.14 Señal invertida corregida.

2.10.2.5. Guardar Rango

Otra utilidad que tiene la interfaz gráfica es la posibilidad de guardar el rango actual de datos que se está estudiando en una hoja de Excel, la misma que puede ser abierta posteriormente por la opción de la ventana de inicio de importar datos de Excel.

Al hacer clic en este botón, se desplegará una ventana de diálogo solicitando al usuario que seleccione un nombre y ubicación para el archivo como se indica en la Figura 2.15.

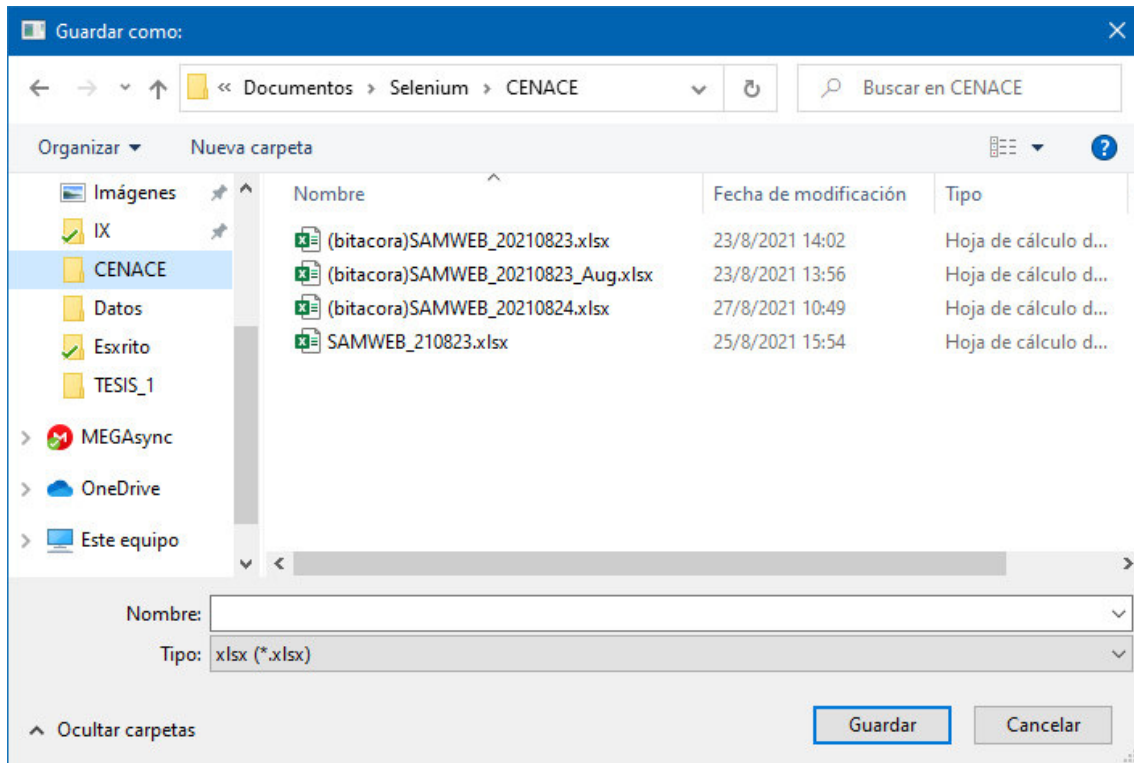


Figura 2.15 Diálogo para guardar rango de datos.

2.10.2.6. Cálculo de Coeficientes y Presentación de Resultados

Para calcular los coeficientes de los modelos al hacer clic en el botón “Calcular” la ventana principal cambia a su segunda ventana en donde muestra la información de los coeficientes para los modelos exponencial, ZIP con dos restricciones y ZIP con una restricción como se indica en la Figura 2.16.

En esta ventana los resultados están separados por fase y el botón Guardar Resultados guarda todos los datos en una hoja de Excel. Adicionalmente en esta ventana se despliega el MSE y el RMSE de cada modelo en valores por unidad que van de cero a uno, indicando qué tan bien se desempeña el modelo comparado con los datos de prueba.

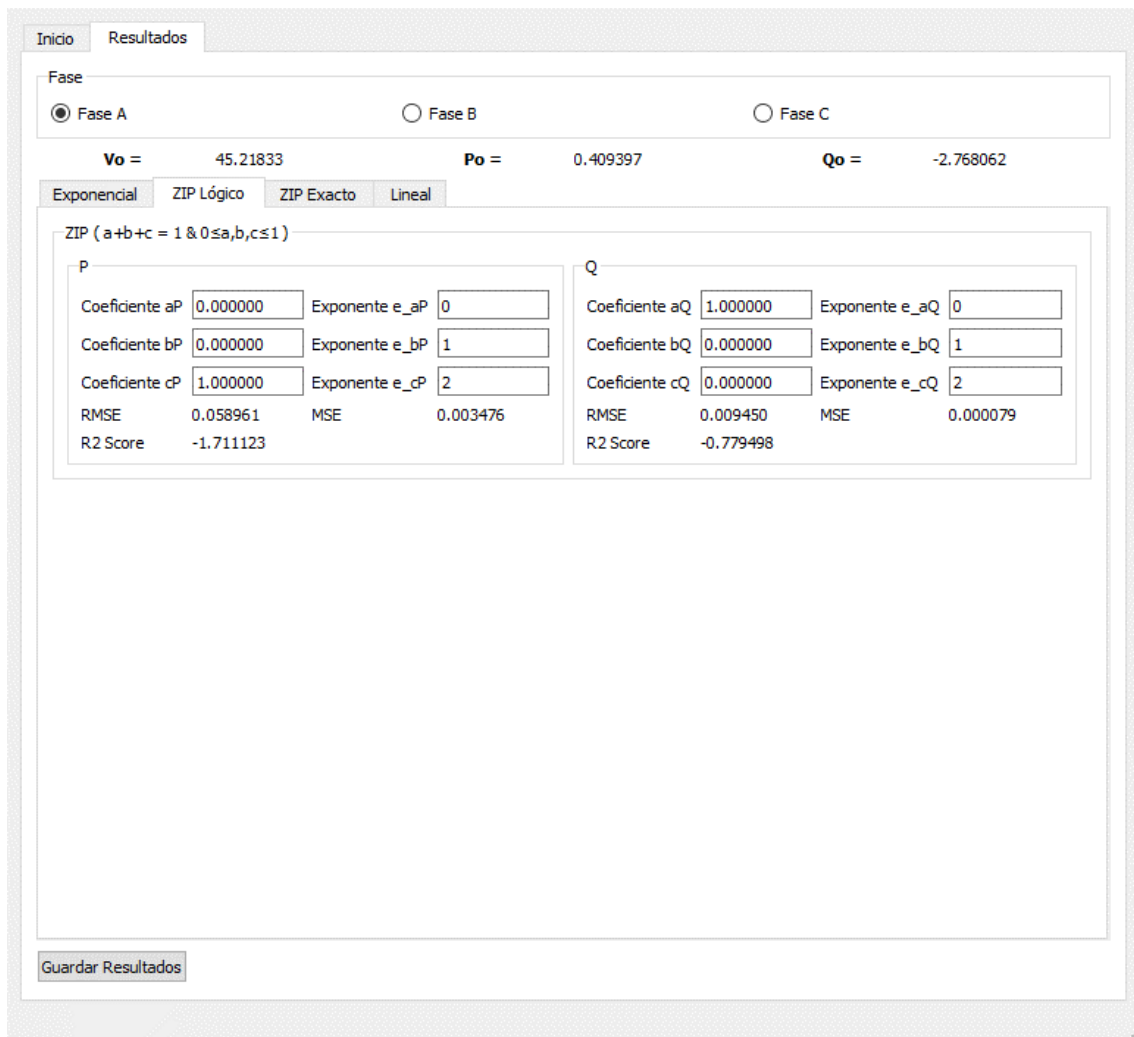


Figura 2.16 Ventana de Resultados.

2.10.3. MODULARIZACIÓN

Durante la programación de la herramienta computacional, el algoritmo encargado de calcular los coeficientes de los modelos de carga y otras funciones de la interfaz gráfica fueron programados en un módulo con el nombre events.py con la finalidad de poder usar estos algoritmos de manera repetitiva dentro de la programación principal y poder usarlo para el submuestreo en un algoritmo que se programó separadamente de la interfaz gráfica.

2.11. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS

Para evaluar el desempeño de los modelos de carga obtenidos se emplean los datos de prueba, tanto de voltaje como de potencias, que se separaron como se indica en 2.9 siendo necesario el cálculo de las potencias estimadas para ser comparadas con las potencias medidas y aplicar las fórmulas (1.55) y (1.56).

Como ejemplo, se puede calcular el valor estimado de la potencia activa para el modelo exponencial con la siguiente ecuación:

$$\hat{P} = P_0 (\bar{V}_{prueba\ p.u})^a \quad (2.13)$$

En donde:

\hat{P} : es la potencia estimada

Y luego aplicar una de las fórmulas de medida del desempeño, por ejemplo, la medida del MSE:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2 \quad (2.14)$$

De manera análoga se repetiría este procedimiento para la potencia reactiva y para el cálculo del RMSE.

2.12. SUBMUESTREO

Para obtener el submuestreo de los datos del registrador se genera un algoritmo en Python que simule la toma de datos hasta 200 veces más lento que la frecuencia original, para lo cual se siguen los siguientes pasos:

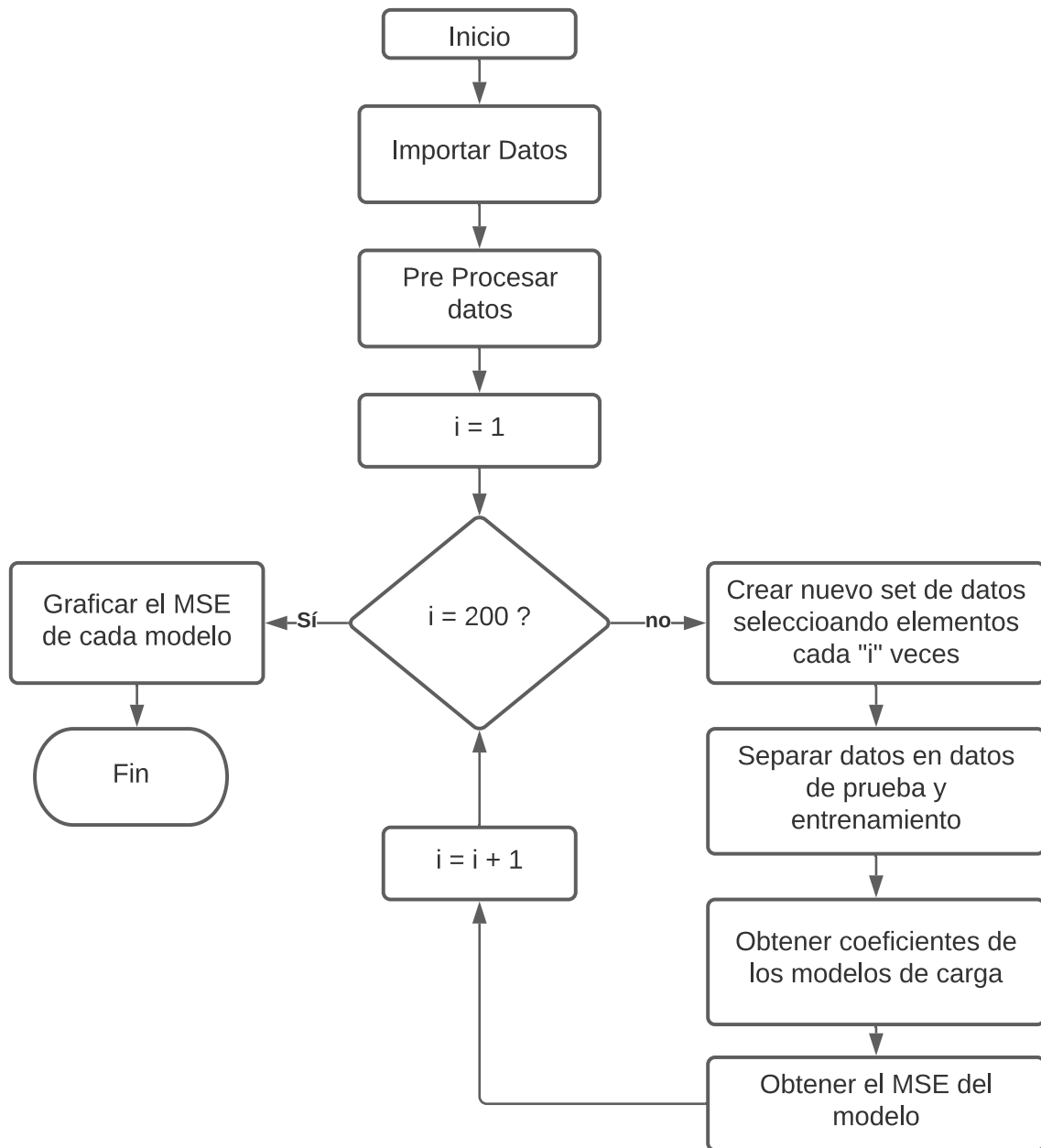


Figura 2.17 Diagrama de flujo del proceso de submuestreo.

Los gráficos del MSE de cada modelo de cada submuestra serán de utilidad para entender en qué relación cambian los errores de los modelos de cargas al usar menos muestras de datos.

Un ejemplo del Submuestreo con saltos de 2 en 2, realizado sobre el conjunto de datos se presenta en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Conjunto de datos original.

Tiempo	Voltaje Fase A RMS	Voltaje Fase B RMS	Voltaje Fase C RMS	Line group 1 Real Pwr A	Line group 1 React Pwr A	Line group 1 Real Pwr B	Line group 1 React Pwr B	Line group 1 Real Pwr C	Line group 1 React Pwr C
0	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,108	0,385	-2,909
0,000065	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,108	0,385	-2,909
0,00013	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,108	0,385	-2,908
0,000195	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,00026	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,107	0,385	-2,909
0,000326	45,129	45,092	44,594	0,344	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000391	45,129	45,093	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000456	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000521	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000586	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,819	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000651	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000716	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000781	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000846	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,105	0,383	-2,908
0,000911	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,105	0,384	-2,908
0,000977	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,260	-3,105	0,383	-2,908
0,001042	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,260	-3,104	0,383	-2,908

Tabla 2.3 Conjunto de datos resultante.

Tiempo	Voltaje Fase A RMS	Voltaje Fase B RMS	Voltaje Fase C RMS	Line group 1 Real Pwr A	Line group 1 React Pwr A	Line group 1 Real Pwr B	Line group 1 React Pwr B	Line group 1 Real Pwr C	Line group 1 React Pwr C
0	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,108	0,385	-2,909
0,00013	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,108	0,385	-2,908
0,00026	45,129	45,092	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,107	0,385	-2,909
0,000391	45,129	45,093	44,594	0,343	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000521	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,819	0,259	-3,107	0,384	-2,908
0,000651	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000781	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,106	0,384	-2,908
0,000911	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,259	-3,105	0,384	-2,908
0,001042	45,129	45,093	44,594	0,344	-2,818	0,260	-3,104	0,383	-2,908

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del modelado de carga obtenidos a través del uso de la herramienta computacional que se desarrolló en este trabajo y su implementación en una base de datos de PowerFactory del Plan de Expansión de Transmisión del Departamento de Planeamiento de la Expansión de Transelectric. Adicionalmente, se presentan los resultados del submuestreo efectuado en los datos adquiridos.

3.1. MODELADO DE UNA CARGA EN LA SUBESTACIÓN MULALÓ

Para realizar el modelado de la carga, se realizó la conexión del equipo registrador en la Subestación Mulaló. De todos los eventos registrados por el equipo, se seleccionó uno, en donde se logró registrar un evento que afectó de forma similar a las tres fases como se puede observar en la Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3.

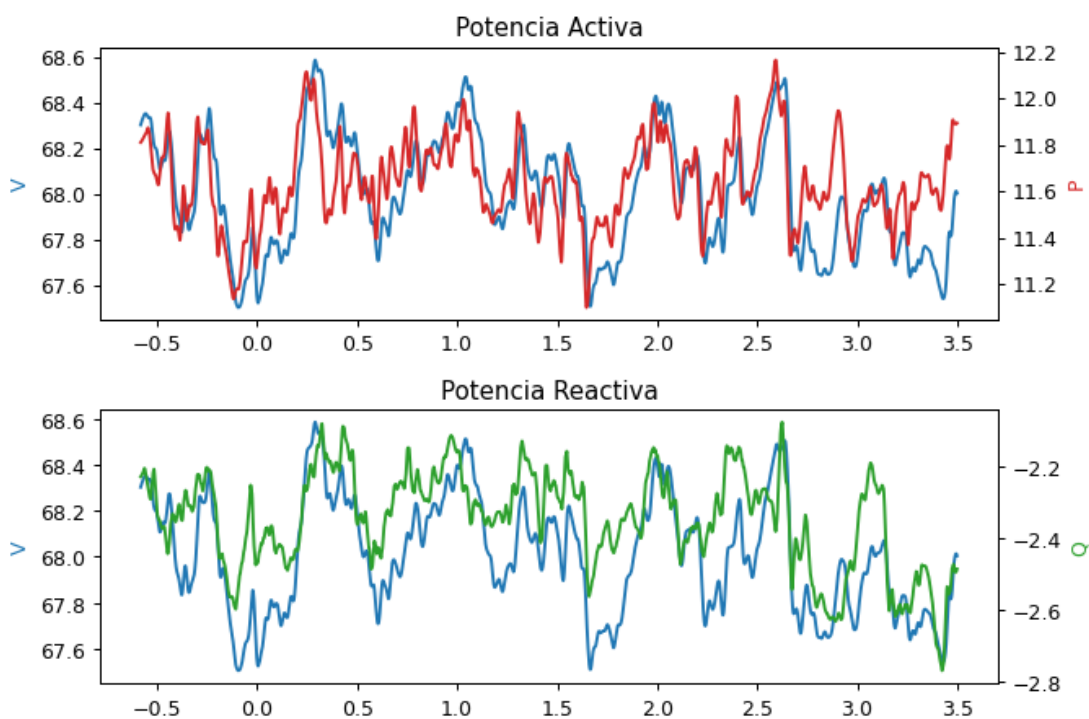


Figura 3.1 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase A (azul) vs. tiempo.

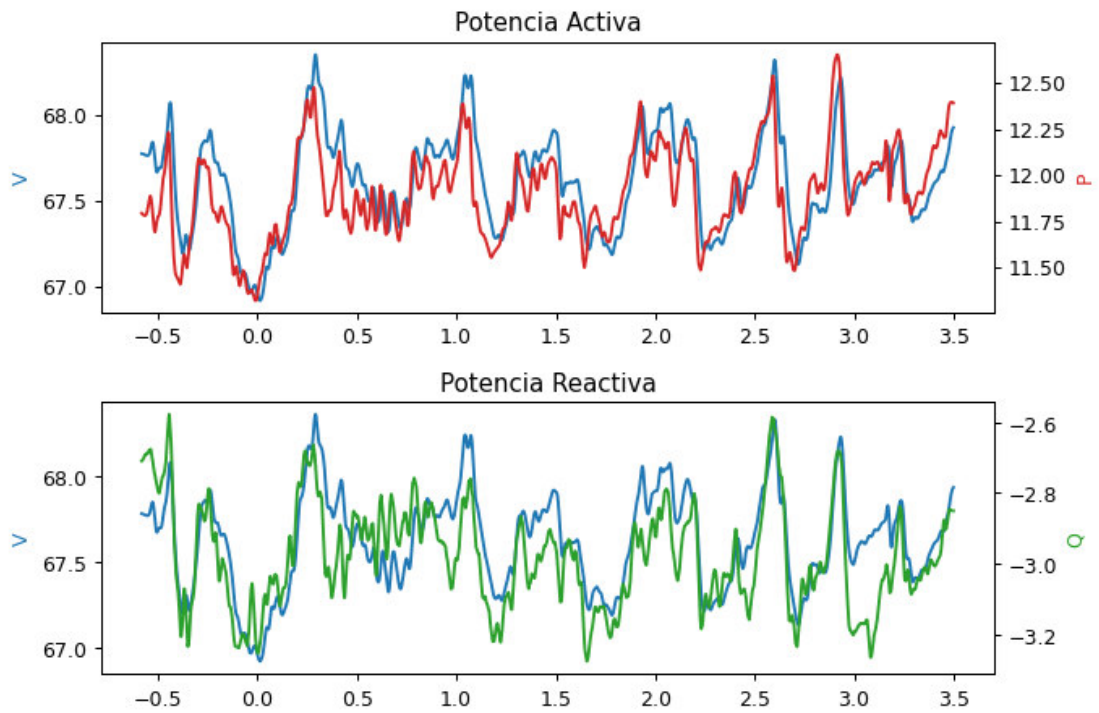


Figura 3.2 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase B (azul) vs. tiempo.

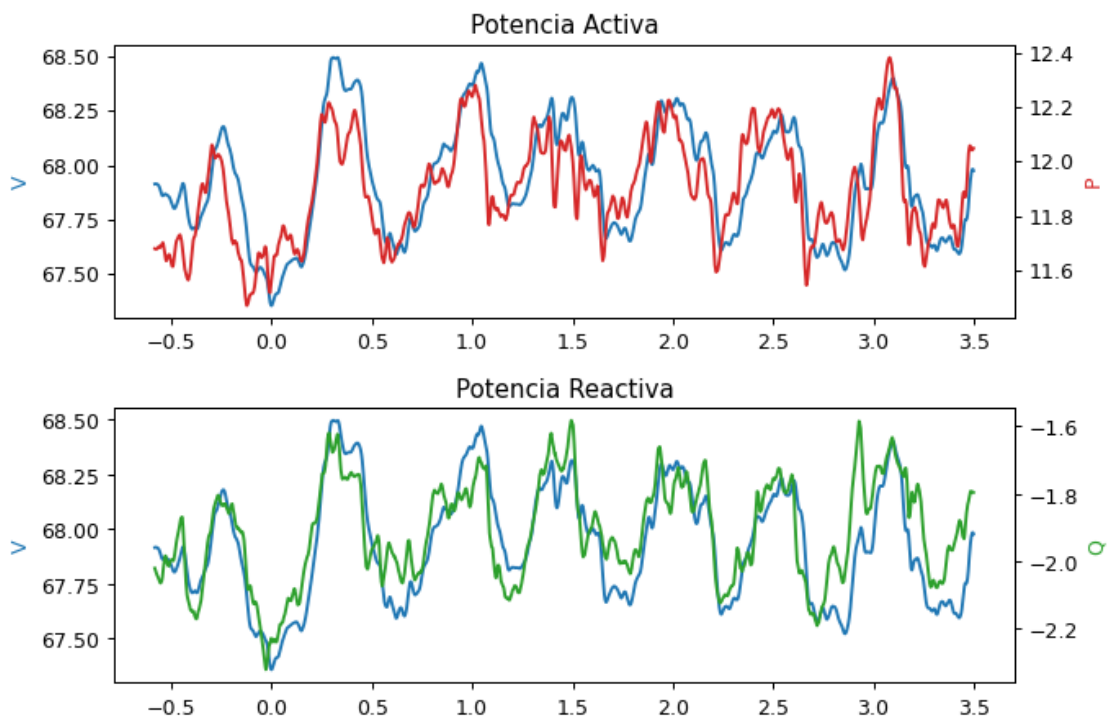


Figura 3.3 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase C (azul) vs. tiempo.

En las tres figuras se puede observar que a partir del segundo 0 hasta alrededor del segundo 0,27 existe una variación de voltaje, potencia activa y reactiva similares en las 3 fases.

Al aislar el rango de datos de estudio, se puede observar con mejor precisión, tal como se presenta en la Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6, la respuesta del sistema ante la perturbación ocurrida.

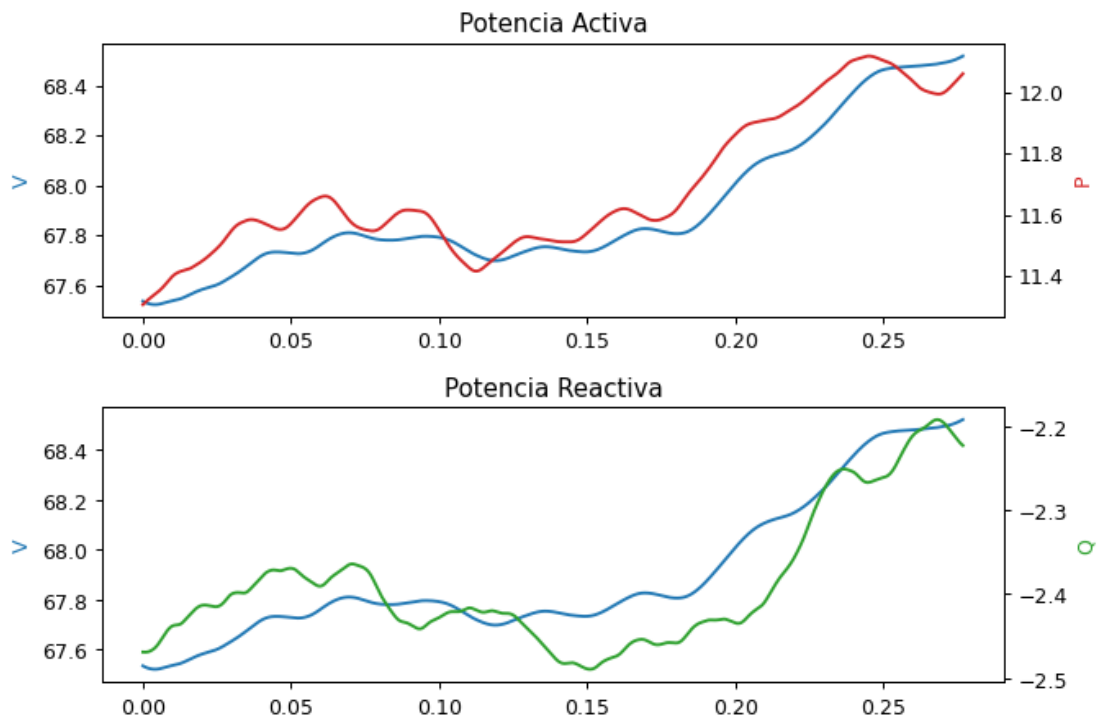


Figura 3.4 Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje (azul) en el rango a estudiar en la fase A vs. tiempo.

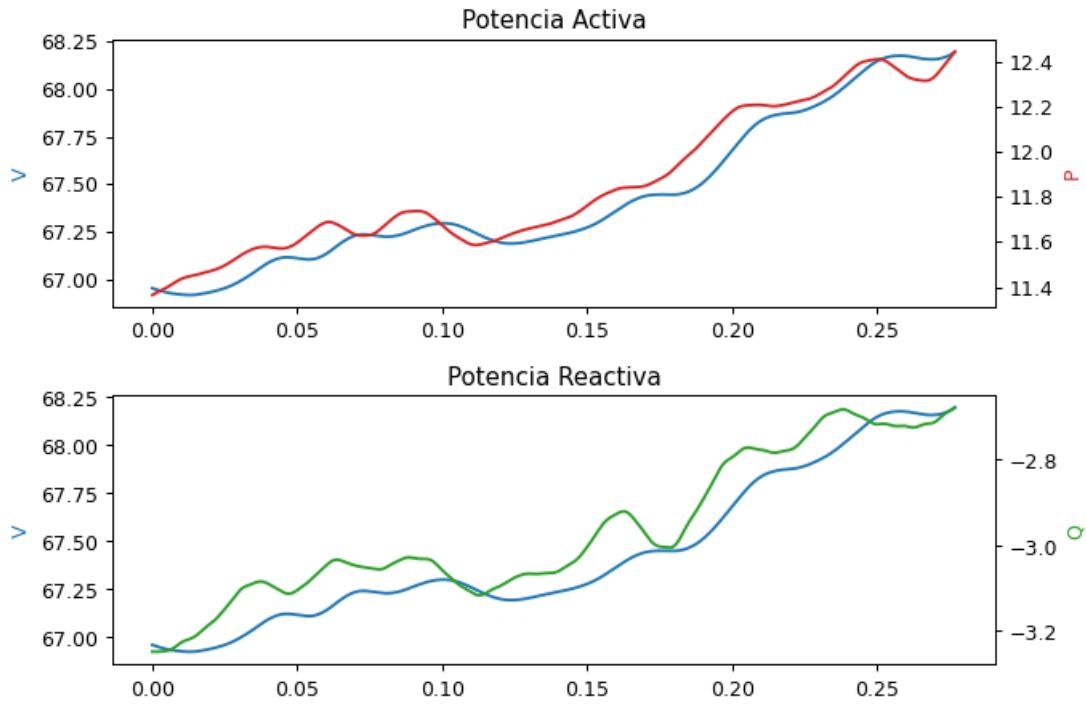


Figura 3.5 Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje (azul) en el rango a estudiar en la fase B vs. tiempo.

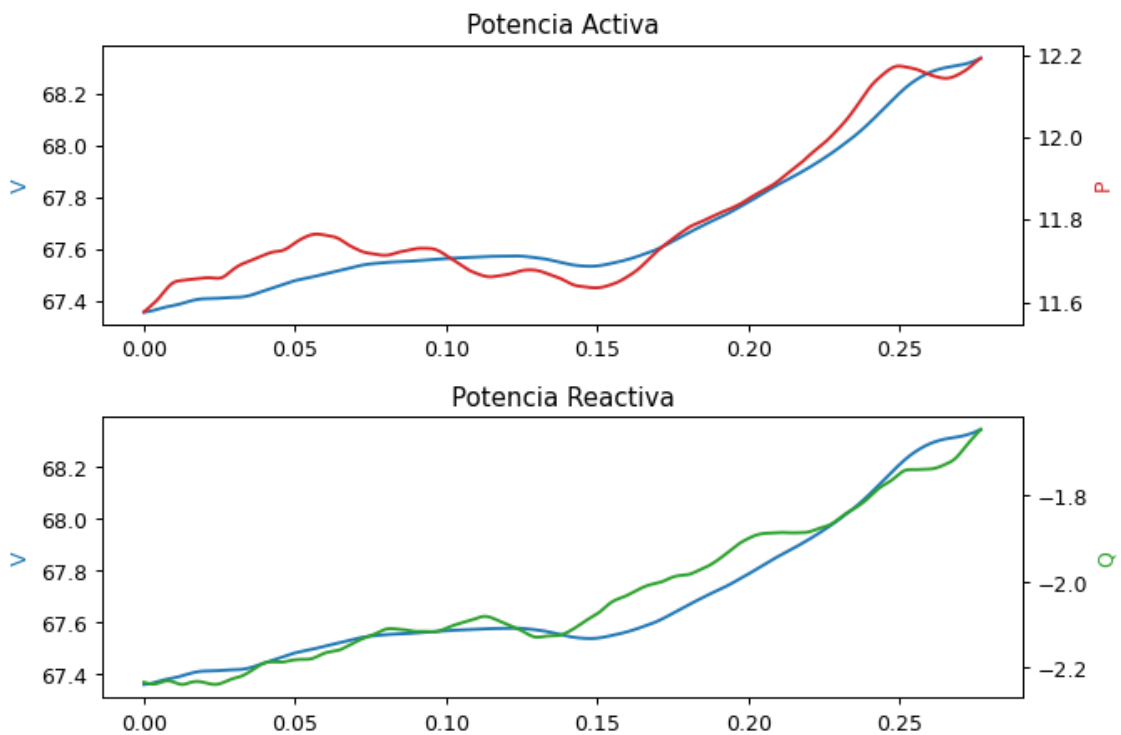


Figura 3.6 Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje (azul) en el rango a estudiar en la fase C vs. tiempo.

Al modelar la carga en el rango mostrado, los resultados de los coeficientes de los modelos son:

Tabla 3.1 Resultados del Modelado de carga para la fase A.

	Modelo ZIP Lógico		Modelo ZIP Exacto		Modelo Exponencial		Modelo Lineal	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Exponente e_aP	0	0	0	0	5,387	-6,467	0	0
Exponente e_bP	1	1	1	1	0	0	1	1
Exponente e_cP	2	2	2	2	0	0	2	2
Coefficiente aP	0	1	-1,907	3,941	1	1	0	1
Coefficiente bP	0	0	0,308	0,326	0	0	1	0
Coefficiente cP	1	0	2,598	-3,267	0	0	0	0
MSE	0,022	0,034	0,006	0,015	0,007	0,015	0,028	0,034
RMSE	7,986E-6	0,001	8,49E-06	1,77E-06	6,11E-05	2,9E-4	7,78E-4	1,09E-3
R2 Score	-0,377	-0,948	0,895	0,717	0,890	0,706	-1,357	-0,948

Tabla 3.2 Resultados del Modelado de carga para la fase B.

	Modelo ZIP Lógico		Modelo ZIP Exacto		Modelo Exponencial		Modelo Lineal	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Exponente e_aP	0	0	0	0	5,300	-11,918	0	0
Exponente e_bP	1	1	1	1	0	0	1	1
Exponente e_cP	2	2	2	2	0	0	2	2
Coefficiente aP	0	1	-1,864	399,178	1	1	0	1
Coefficiente bP	0	0	0,286	-780,054	0	0	1	0
Coefficiente cP	1	0	2,578	381,876	0	0	0	0
MSE	0,029	0,089	0,007	0,010	0,007	0,016	0,037	0,089
RMSE	0,001	0,008	1,36E-05	7,52E-06	7,14E-05	3,43E-04	0,001	0,008
R2 Score	-0,342	-3,304	0,940	0,942	0,936	0,887	-1,307	-3,304

Tabla 3.3 Resultados del Modelado de carga para la fase C.

	Modelo ZIP Lógico		Modelo ZIP Exacto		Modelo Exponencial		Modelo Lineal	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Exponente e_aP	0	0	0	0	3,770	-20,464	0	0
Exponente e_bP	1	1	1	1	0	0	1	1
Exponente e_cP	2	2	2	2	0	0	2	2
Coefficiente aP	0	1	-1,061	9,893	1	1	0	1
Coefficiente bP	0	0	0,314	0,345	0	0	1	0
Coefficiente cP	1	0	1,747	-9,238	0	0	0	0
MSE	0,010	0,094	0,003	0,014	0,003	0,013	0,015	0,094
RMSE	9,64E-05	0,009	5,98E-07	1,08E-05	1,61E-05	2,45E-04	2,20E-04	0,009
R2 Score	0,477	-1,918	0,940	0,928	0,941	0,950	-0,295	-1,918

Estos resultados pueden ser ingresados en los diferentes programas de simulación para poder evaluar el comportamiento de un sistema con modelos de carga dependientes del voltaje. En PowerFactory no se admite el modelado de carga para cada fase como fueron obtenidos los resultados de la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3 sin embargo, al haberse obtenido resultados de un evento trifásico, se asume que en ese momento la carga era balanceada, por lo que se usó los resultados de la fase A para evaluar en una simulación.

3.2. MODELADO DE UNA CARGA EN LA SUBESTACIÓN VICENTINA

Para el modelado de una carga en la subestación Vicentina se seleccionó un conjunto de datos en donde la variación de voltaje era más notoria y similar para las 3 fases como se puede observar en la Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9.

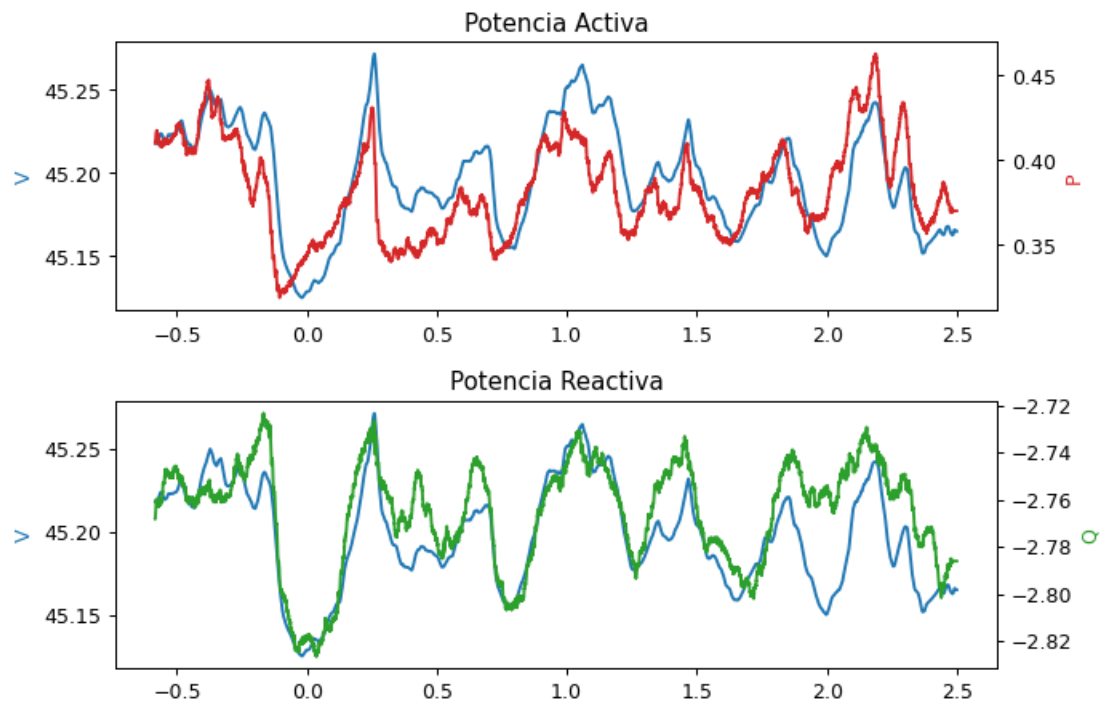


Figura 3.7 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase A (azul) vs. tiempo.

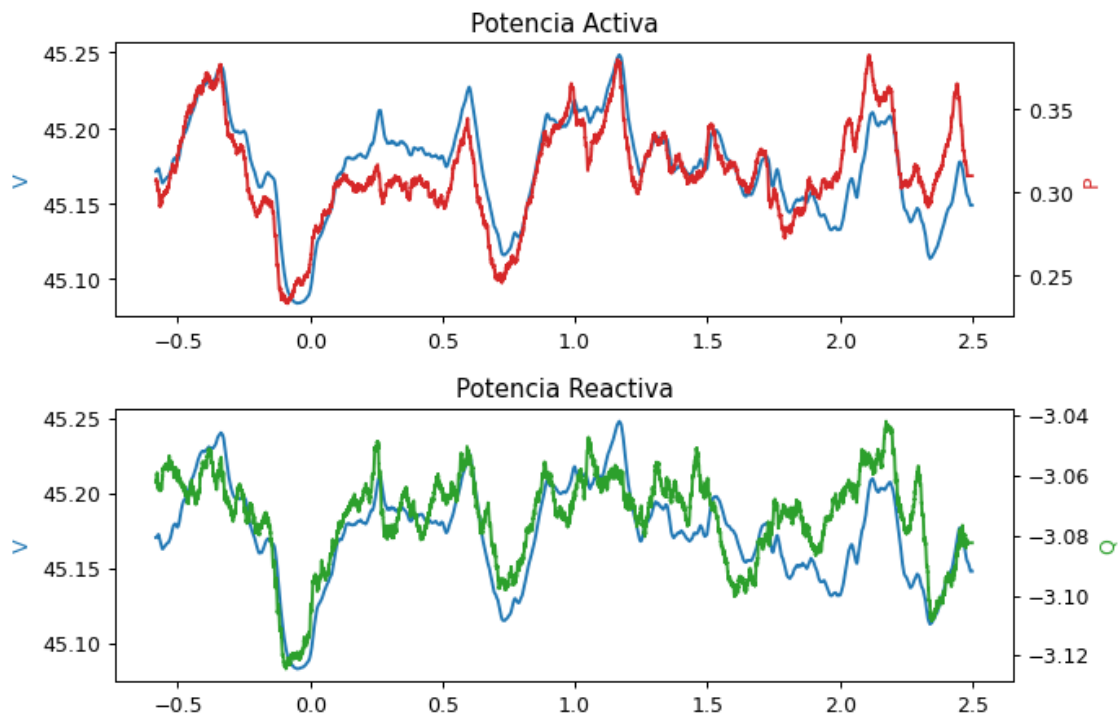


Figura 3.8 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase B (azul) vs. tiempo.

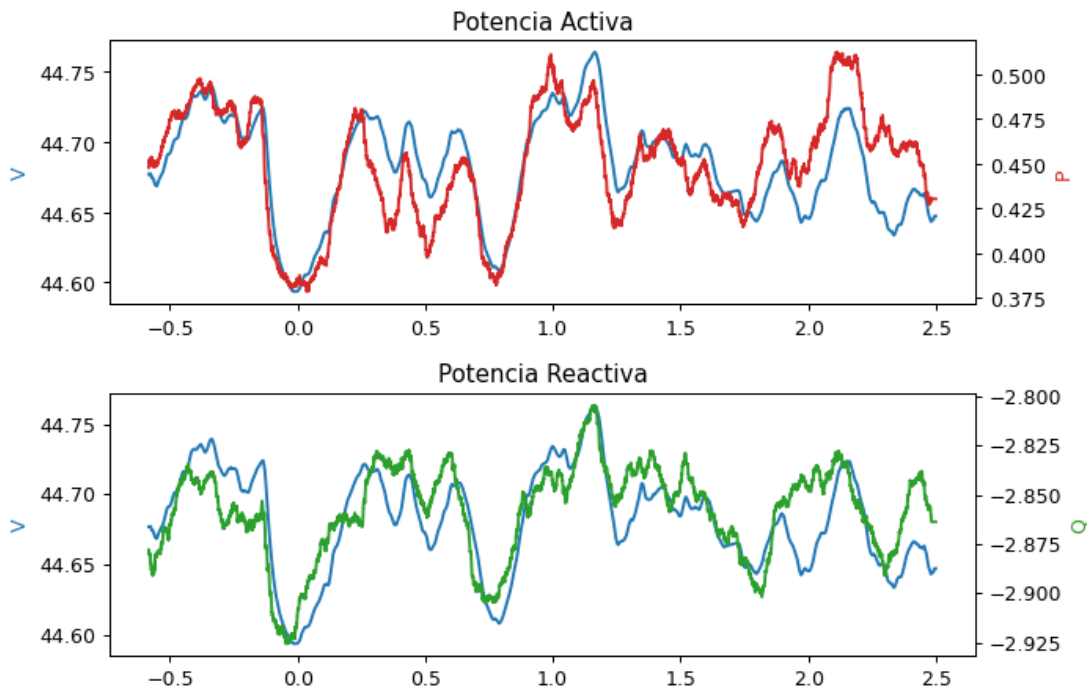


Figura 3.9 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en la fase C (azul) vs. tiempo.

En las tres figuras se puede apreciar que en el rango de tiempo desde los 0 segundos hasta los 0,24 segundos aproximadamente existe una subida de voltaje con una variación de voltaje muy amplia y similar para las 3 fases. Al aislar este rango de tiempo para su estudio se puede observar con mejor precisión la variación de voltaje y como se mencionó al final del punto 3.1, se asume que el evento fue trifásico balanceado estudiando solamente la fase A.

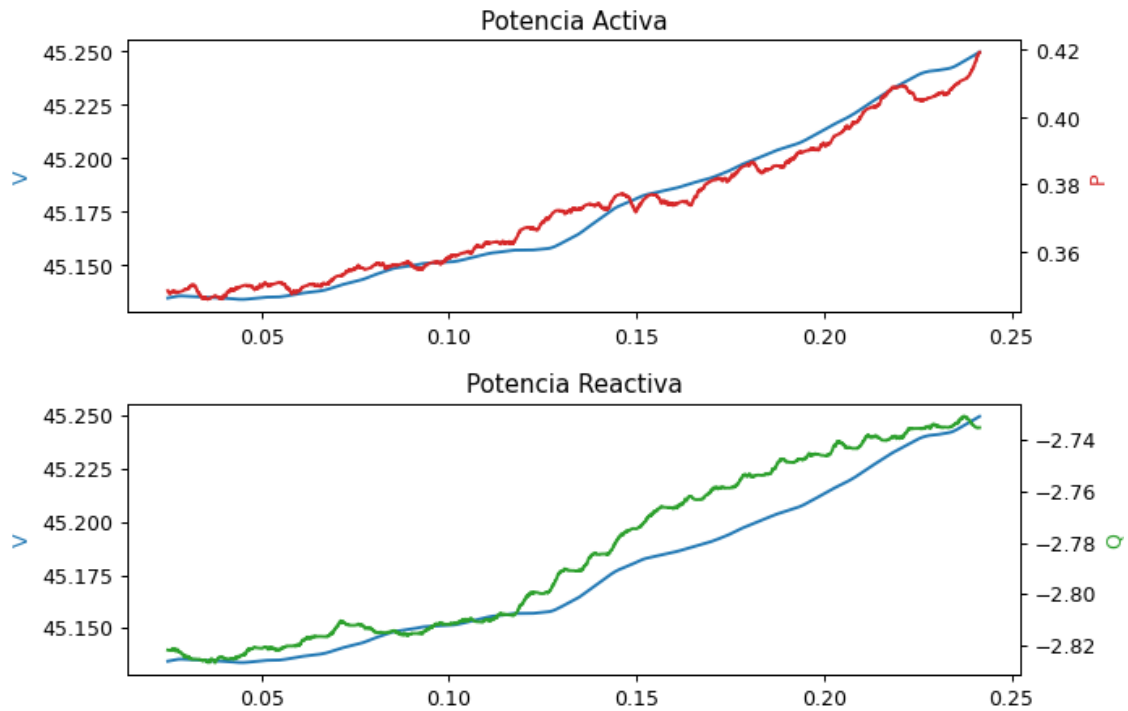


Figura 3.10 Registro de Potencia Activa (rojo), Reactiva (verde) y Voltaje en el rango a estudiar en la fase C vs. tiempo.

Al modelar la carga en el rango de la Figura 3.10 se obtienen los siguientes coeficientes:

Tabla 3.4 Resultados del Modelado de carga para la fase A.

	Modelo ZIP Lógico		Modelo ZIP Exacto		Modelo Exponencial		Modelo Lineal	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Exponente e _{aP}	0	0	0	0	67,722	-14,789	0	0
Exponente e _{bP}	1	1	1	1	0	0	1	1
Exponente e _{cP}	2	2	2	2	0	0	2	2
Coefficient e _{aP}	0	1	-35,235	8,106	1	1	0	1
Coefficient e _{bP}	0	0	0,315	0,337	0	0	1	0
Coefficient e _{cP}	1	0	35,921	-7,444	0	0	0	0
MSE	0,065	0,013	0,006	0,002	0,006	0,002	0,066	0,013
RMSE	0,004	1,77E-04	1,8063E-07	9,3397E-09	6,142E-05	4,801E-06	0,004	1,77E-04
R2 Score	-1,711	-0,779	0,963	0,926	0,958	0,925	-1,784	-0,779

3.3. SIMULACIÓN EN POWER FACTORY

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.4, son usados para realizar una simulación en PowerFactory del Plan de Expansión de Transmisión del Departamento de Planeamiento de la Expansión de Transelectric en el mismo punto de donde se tomaron las mediciones de campo. Debido a que, en las mediciones obtenidas, el voltaje varía en un rango estrecho, se usa el modelo lineal en la simulación tal como se recomienda en [10].

3.3.1. SUBESTACION MULALÓ

En esta subestación las mediciones fueron tomadas en la barra de 69 kV, en la bahía que corresponde a la Empresa Eléctrica Cotopaxi, se incorpora los resultados del modelado en esta carga. Para obtener un cambio de voltaje sobre la barra de 69 kV de la subestación Mulaló se simula una contingencia que deja fuera de servicio la línea de transmisión Ambato – Totoras de 138 kV. Esta línea de transmisión es seleccionada debido a que cuenta con una cargabilidad elevada y su desconexión podría producir un cambio en el voltaje de las barras cercanas.

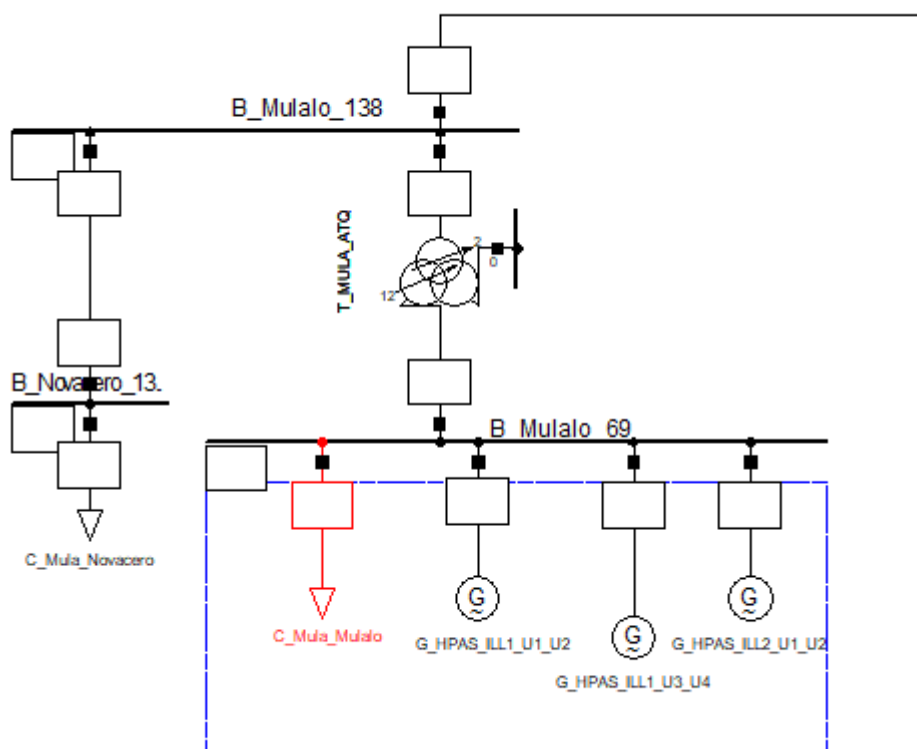


Figura 3.11 Barra Mulaló 69 kV.

Los resultados del flujo de potencia de la subestación Mulaló, se muestran en la Figura 3.11.

Tabla 3.5 Resultados Obtenidos para la Simulación de la Subestación Mulaló.

	Antes de Contingencia			En contingencia		
	Sin Modelo	Con Modelo	Variación (%)	Sin Modelo	Con Modelo	Variación (%)
V [kV]	69.7	69.7	0.0	67.9	67.9	0.0
P [MW]	11.8	11.9	1.0	11.8	11.6	1.6
Q [MW]	3.4	3.4	0.0	3.4	3.4	0.0
V [p.u.]	1.01	1.01	0.01	0.98	0.98	0.00

En la Tabla 3.5 se puede apreciar que al aplicar el modelo de carga en los escenarios antes y después de la contingencia la magnitud de la potencia activa se ve alterada al usar o no dicho modelo. En el caso de contingencia, la variación de la potencia activa es de 1,6 MW, esto se debe que el voltaje disminuye desde 69,7 a 67,9 kV; la magnitud de la potencia reactiva, para el modelo lineal obtenido en la Tabla 3.1 permanece constante ante los escenarios propuestos.

3.3.2. SUBESTACIÓN VICENTINA

En esta subestación las mediciones fueron tomadas en la barra de 46 kV por lo que se reemplaza los resultados del modelado en esta barra. Para obtener un cambio de voltaje sobre esta barra, se simula una contingencia que deja fuera de servicio las líneas de transmisión Conocoto – Santa Rosa 1 y Santa Rosa – Mirador Alto pues estas se encuentran en la misma torre y además cuentan con una cargabilidad elevada y su desconexión podría producir un cambio en el voltaje de las barras cercanas.

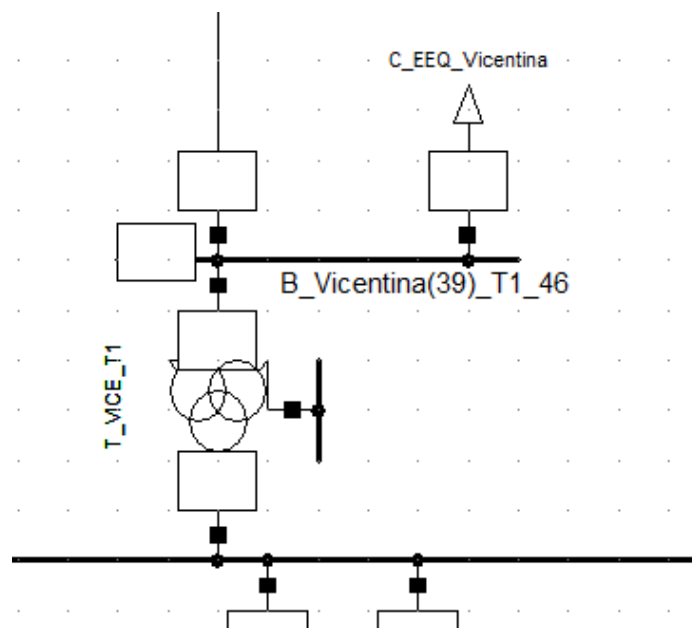


Figura 3.12 Barra Vicentina 46 kV.

Los resultados de los flujos de potencia de esta subestación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.6 Resultados Obtenidos para la Simulación de la Subestación Vicentina.

	Antes de Contingencia			En contingencia		
	Sin Modelo	Con Modelo	variación (%)	Sin Modelo	Con Modelo	variación (%)
V [kV]	46.0	46.0	0.0	44.2	44.2	0.0
P [MW]	14.5	14.5	0.0	14.5	14.0	3.9
Q [MW]	0.4	0.4	0.0	0.4	0.4	0.0
V [p.u]	1.000	1.000	0.017	0.960	0.961	0.015

En la Tabla 3.6 se puede apreciar que al aplicar el modelo de carga en los escenarios antes y después de la contingencia, la magnitud de la potencia activa se ve alterada al usar o no dicho modelo. En el caso de contingencia, la variación de la potencia activa es de 3,9 MW, esto se debe que el voltaje disminuye desde 46 a 44,2 kV; la magnitud de la potencia reactiva, para el modelo lineal obtenido en la Tabla 3.4 permanece constante ante los escenarios propuestos.

3.4. CAMBIO DE FRECUENCIA DE MUESTRAS

El registrador usado en este proyecto tiene la capacidad de tomar mediciones con frecuencias de hasta 30,72 kHz, en este trabajo se usó la frecuencia de muestro de transitorios de 15,36 kHz. Una alta frecuencia de muestreo puede ser una limitación para registradores de otros fabricantes, así como para el mismo modelado debido la gran cantidad de datos que se necesita procesar.

Una reducción en la cantidad de datos a modelar implica además la reducción en la precisión, sin embargo, si la perdida de precisión resulta no ser considerable para un efecto práctico, permitiría que el algoritmo sea más eficiente y que el almacenamiento de los datos permita tener una mayor cantidad de registros.

Para determinar cuál podría ser una frecuencia mínima de muestreo que pueda considerarse adecuada, se realiza un “submuestreo” o “undersampling” sobre los datos usados para el modelado de carga. Para lograr este efecto, el procedimiento mencionado anteriormente se desarrolla en un script secundario en el lenguaje Python.

Al realizar el submuestreo, prácticamente dividiendo la frecuencia base, se tiene los siguientes resultados de frecuencias y períodos:

Tabla 3.7 Nuevas frecuencias del submuestreo.

Frecuencia	Período	Dividendo/Salto
15384	6,5E-05	Ninguno
7692	0,00013	2
3846	0,00026	4
2564	0,00039	6
1923	0,00052	8
1538	0,00065	10
769	0,0013001	20
385	0,0026001	40
256	0,0039002	60
192	0,0052002	80
154	0,0065003	100
128	0,0078003	120
110	0,0091004	140
96	0,0104004	160
85	0,0117005	180
77	0,0130005	200

Esta tabla solo representa una fracción de los resultados pues los dividendos de la frecuencia fueron desde 1 hasta 200 de uno en uno.

Usando el mismo rango de datos que se usó en el modelado de carga en el punto 3.2 y para cada una de las nuevas frecuencias obtenidas como resultado el submuestreo realizado en el punto 2.12 se presentan los errores obtenidos por el MSE vs Saltos entre muestras

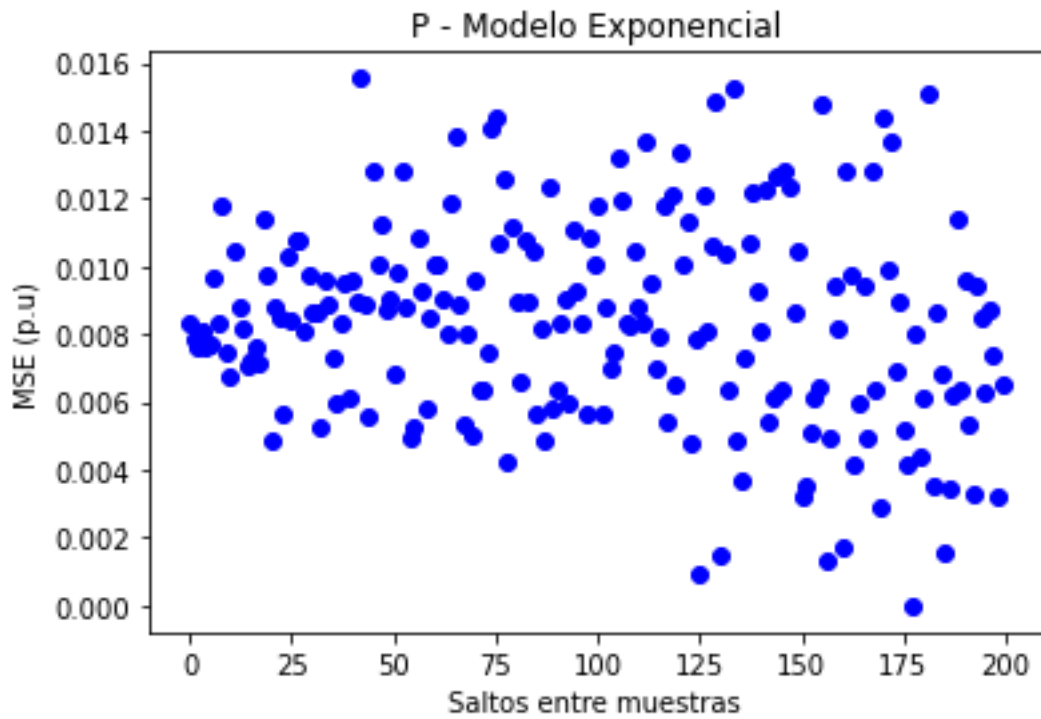


Figura 3.13 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia activa en el modelo exponencial.

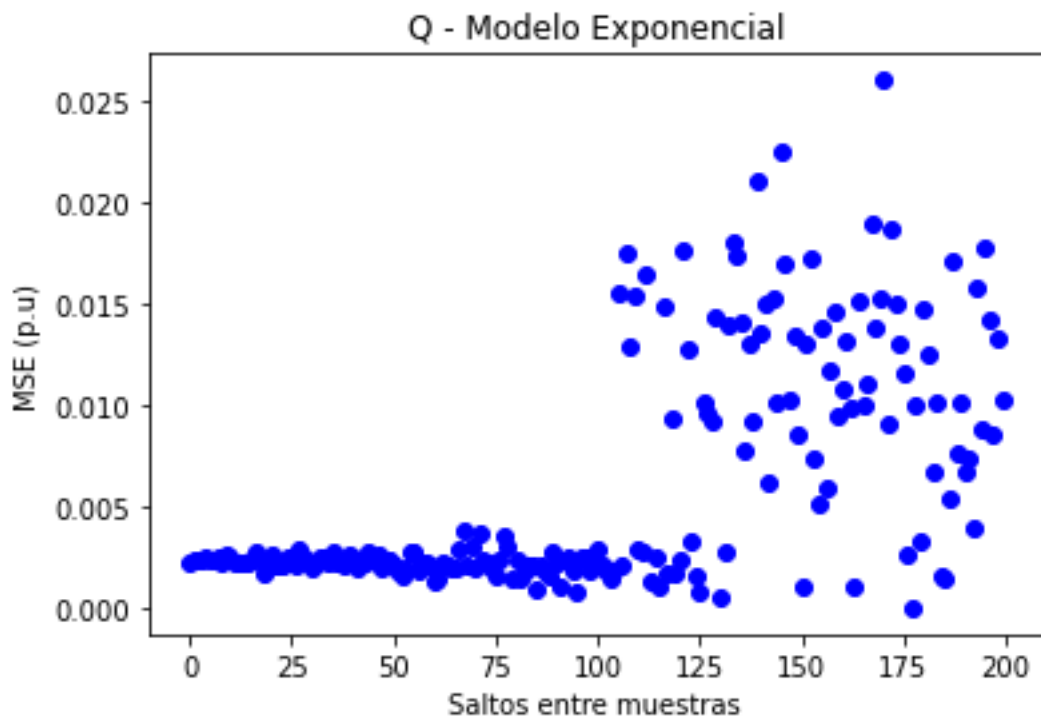


Figura 3.14 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia reactiva en el modelo exponencial.

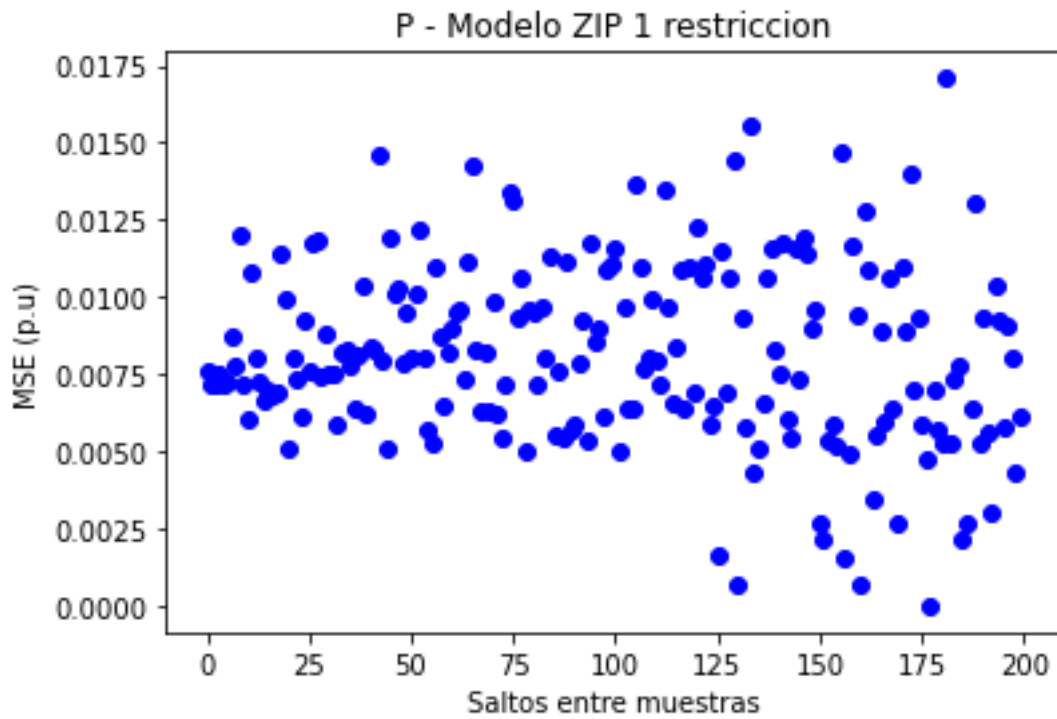


Figura 3.15 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia activa en el modelo ZIP de una restricción.

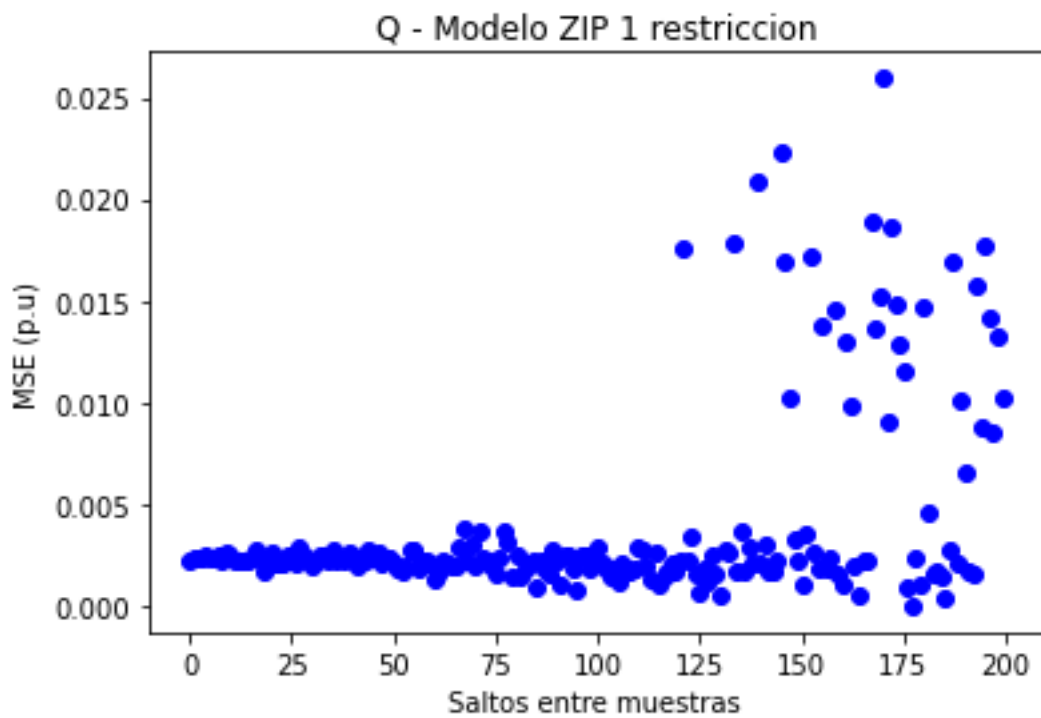


Figura 3.16 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia reactiva en el modelo ZIP de una restricción.

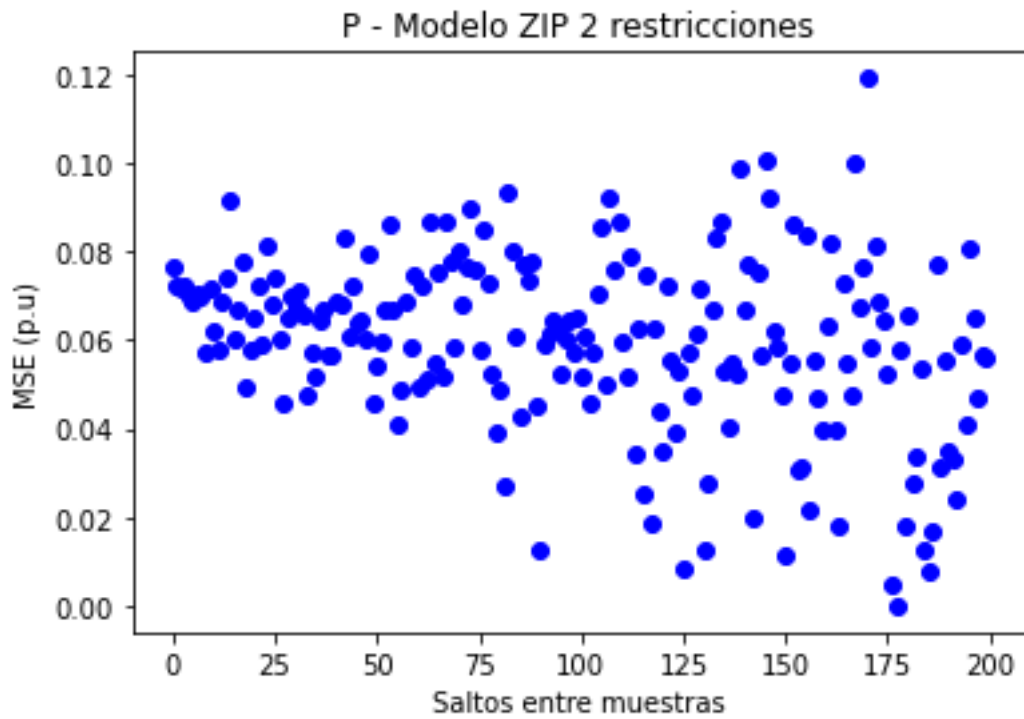


Figura 3.17 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia activa en el modelo ZIP con dos restricciones.

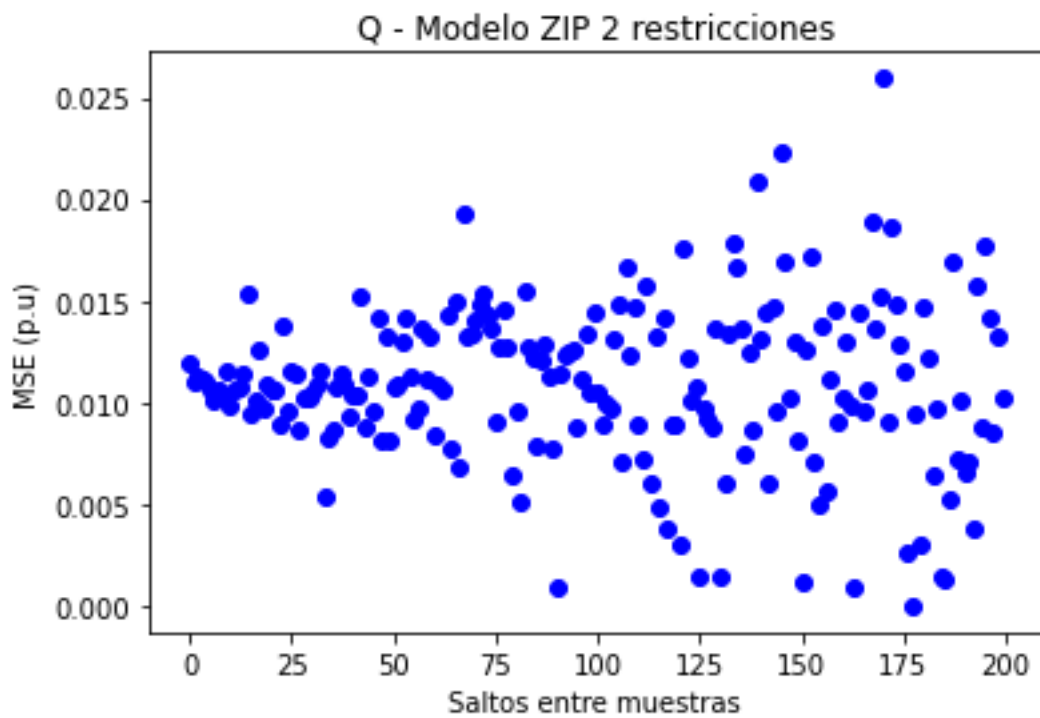


Figura 3.18 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia reactiva en el modelo ZIP con dos restricciones.

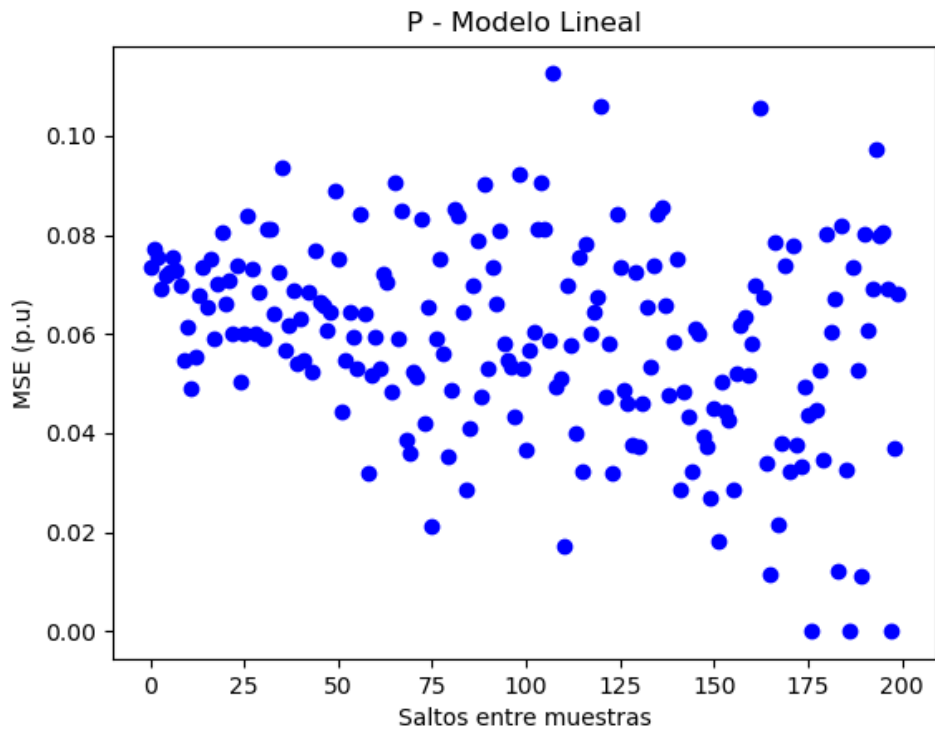


Figura 3.19 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia activa en el modelo lineal.

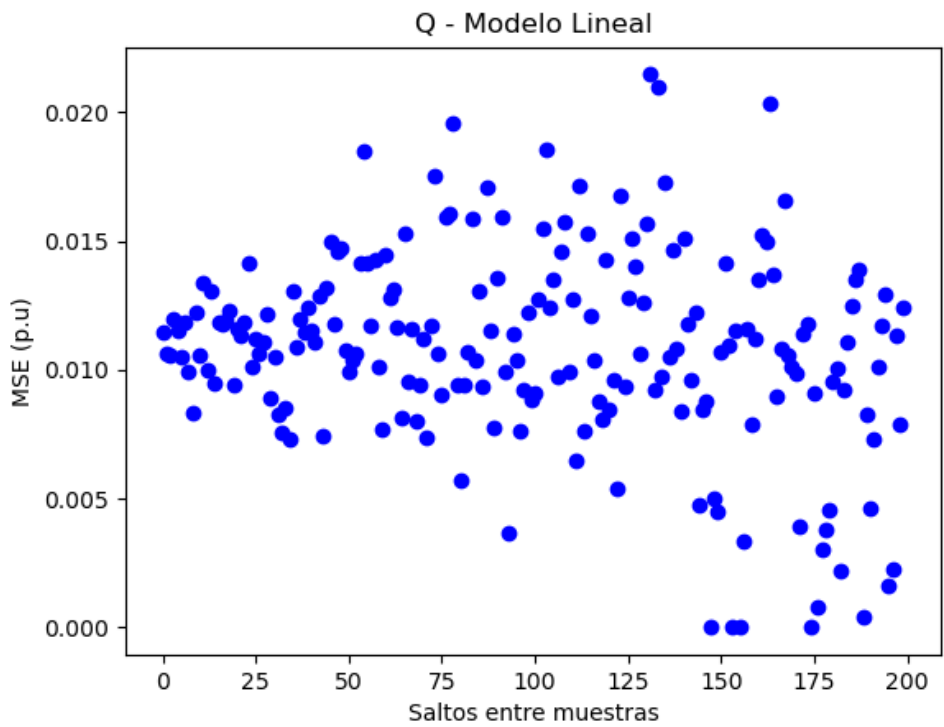


Figura 3.20 MSE vs. Salto entre muestras para la potencia reactiva en el modelo lineal.

Visualmente es evidente que cuando la frecuencia de muestreo es menor (saltos más grandes) los errores tienden a dispersarse más y a tener una magnitud mayor.

Para el modelo polinomial (ZIP) de una restricción, exponencial y lineal, los errores de hasta 100 saltos entre muestra se mantienen dentro de un rango más estrecho que para los de saltos superiores por lo que para estos modelos de carga se puede recomendar una frecuencia de muestreo mínima de 154 Hz. En cambio es el modelo polinomial de dos restricciones los errores se mantienen dentro de un rango más estrecho hasta los 75 saltos entre muestras por lo que para este modelo se puede recomendar una frecuencia mínima de muestreo de 205 Hz.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La herramienta computacional se desarrolló de forma completa usando Python como lenguaje de programación, dicha herramienta permite calcular los coeficientes de los modelos de cargas polinomiales o ZIP y exponencial gracias a los módulos Scipy y Numpy, además esta herramienta permite la evaluación del desempeño de dichos modelos mediante los indicadores MSE y RMSE.
- La potencia activa pudo ser representada por el modelo lineal de la carga, la potencia reactiva no fue representada de forma adecuada con este modelo pues al limitar la ecuación a una representación matemática de primer orden inferiría la necesidad de una ecuación de orden superior para representar la parte reactiva de una carga.
- Para el equipo registrador AMTEK Tr3000, se puede usar la frecuencia mínima de muestro de 1,92 kHz o un período de 0,00052 s que es la frecuencia que se obtiene al dividir 8 veces la frecuencia máxima. En todas las gráficas se puede apreciar el submuestreo con esta frecuencia.
- Para los modelos polinomial de una restricción y exponencial, se puede observar que alrededor de hasta 100 saltos entre muestras (frecuencia 154 Hz), la mayoría de los MSE se mantiene dentro de un rango pequeño y sobre los 101 saltos de muestras en adelante los MSE tienen mayor dispersión. Por lo tanto, puede concluir para estos modelos, una frecuencia mínima de 154 Hz podría ser ideal para el modelado de carga.

- Para el modelo polinomial de dos restricciones, se puede observar que, alrededor de 75 saltos entre muestras (frecuencia de 205 Hz), los MSE tienen mayor dispersión. Podría inferirse para este modelo de carga, una frecuencia de muestreo de 205 Hz o más sería ideal para el modelado de carga.
- Dentro del software desarrollado, el archivo events.py fue diseñado de tal forma que pueda ser importado por otros programas para realizar el cálculo de los coeficientes de la carga según el modelo. Para ello se debe importar la función “calcular_coeficientes” y asignarle como parámetros de entrada el dataframe de datos de prueba (entrenamiento), los índices de las columnas de voltaje y de potencia activa/reactiva y el modelo a usarse.
- Al implementar los nuevos modelos de carga en la simulación del SNI, se obtuvo una variación en los flujos de potencia de las cargas. Estos nuevos flujos de potencia representarían de forma más adecuada el comportamiento actual del sistema siendo dicho comportamiento de gran importancia en la toma de decisiones de planificación y operación del sistema. Además, estos nuevos modelos de carga tienen un comportamiento ante los estudios de estabilidad, en este trabajo se demuestra que, en el estado de contingencia, las cargas de Vicentina y Mulalo disminuyeron la potencia activa que demandaban lo cual permite que el sistema encuentre un nuevo punto de equilibrio de voltaje disminuyendo la probabilidad de colapso parcial
- El registrador de señales se colocó en las subestaciones Vicentina y Mulaló del SNT. Debido que estos puntos son robustos eléctricamente las variaciones de voltaje por perturbaciones en el sistema fueron pequeñas, por esta razón se usa el modelo lineal de carga.
- En el programa PowerFactory de Digsilent, en los modelos de carga, el modelo de la potencia activa está separado del de potencia reactiva, por lo que se podría usar un modelo de carga diferente para la parte activa y reactiva. Esto podría permitir el obtener una simulación más fiel al comportamiento real de la carga modelada.

4.2. RECOMENDACIONES

- Para futuros modelados de carga, usar variaciones de voltaje provocadas por perturbaciones en el sistema que impliquen una variación de al menos 10% de nivel de voltaje, con el fin de disminuir los efectos de la fluctuación natural de la

carga y que los modelos de carga puedan adaptarse de manera adecuada a las mediciones evitando así coeficientes de determinación negativos.

- Para equipos registradores de otros fabricantes, se sugiere que la frecuencia mínima de muestro sea mayor o igual a 154 Hz.
- Se recomienda continuar este trabajo complementándolo con estudios de modelos dinámicos de la carga pues algunos componentes del sistema eléctrico, en donde se incluyen una gran variedad de cargas, tienden a responder de manera no instantánea.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. S. Carneiro, L. F. Araujo, J. L. R. Pereira, P. A. N. Garcia, I. D. Melo, y M. B. Amaral, «Static load modeling based on field measurements», en 2017 IEEE Manchester PowerTech, jun. 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/PTC.2017.7981230.

[2] A. PEREZ TELLEZ, «Modelling aggregate loads in power systems», KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Sweden, 2017. Accedido: 17 de marzo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1085518/FULLTEXT01.pdf>

[3] Y. Ge, A. J. Flueck, D.-K. Kim, J.-B. Ahn, J.-D. Lee, y D.-Y. Kwon, «An Event-Oriented Method for Online Load Modeling Based on Synchrophasor Data», IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, n.º 4, pp. 2060-2068, jul. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2405920.

[4] J. V. Milanovic, K. Yamashita, S. Martínez Villanueva, S. Ž. Djokic, y L. M. Korunović, «International Industry Practice on Power System Load Modeling», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, n.º 3, pp. 3038-3046, ago. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2231969.

[5] G. G. Karady y K. E. Holbert, Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach. John Wiley & Sons, 2013.

[6] «Load representation for dynamic performance analysis (of power systems)», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, n.º 2, pp. 472-482, may 1993, doi: 10.1109/59.260837.

[7] P. Kundur, Power System Stability and Control. McGraw-Hill Education, 1994.

[8] M. Sadeghi y G. A. sarvi, «Determination of ZIP parameters with least squares optimization method», en 2009 IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC), oct. 2009, pp. 1-6. doi: 10.1109/EPEC.2009.5420883.

[9] «Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, n.º 1, pp. 523-538, feb. 1995, doi: 10.1109/59.373979.

- [10] «Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks», e-cigre. <https://e-cigre.org/publication/566-modelling-and-aggregation-of-loads-in-flexible-power-networks> (accedido 6 de abril de 2021).
- [11] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, y D. Zhao, «Load Modeling—A Review», IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, n.º 6, pp. 5986-5999, nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2700436.
- [12] D. C. Montgomery, E. A. Peck, y G. G. Vining, Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] K. A. Ansari y B. Dichone, An Introduction to Numerical Methods Using MATLAB. SDC Publications, 2019.
- [14] F. M. Dekking, C. Kraaikamp, H. P. Lopuhaä, y L. E. Meester, A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding Why and How. Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] Butt, Introduction to Numerical Analysis Using MATLAB®. Jones & Bartlett Learning, 2009.
- [16] R. A. Barnett, M. R. Ziegler, y K. E. Byleen, Calculus for Business, Economics, Life Sciences, and Social Sciences. Pearson Education, 2014.
- [17] D. Bertsekas, Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods. Athena Scientific, 1996.
- [18] H. W. Kuhn y A. W. Tucker, «Nonlinear Programming», Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, pp. 481-492, ene. 1951.
- [19] P. B. and T. Burzykowski, 15 Model-performance Measures | Explanatory Model Analysis. Accedido: 3 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ema.drwhy.ai/modelPerformance.html>
- [20] C. J. Willmott y K. Matsuura, «Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance», Climate Research, vol. 30, n.º 1, pp. 79-82, dic. 2005, doi: 10.3354/cr030079.
- [21] Y. C. C. Rivera, «ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN EL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO CONSIDERANDO LA CONEXIÓN DE LA LÍNEA VICENTINA-SANTA ROSA 138 kV», p. 101.
- [22] E. L. Lehmann y G. Casella, Theory of Point Estimation. Springer Science & Business Media, 2006.
- [23] C. J. Willmott y K. Matsuura, «On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators», International Journal of Geographical Information Science, vol. 20, n.º 1, pp. 89-102, ene. 2006, doi: 10.1080/13658810500286976.
- [24] J. L. Devore, Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, International Metric Edition. Brooks/Cole, 2016.
- [25] A. P. Barten, «The coefficient of determination for regression without a constant term», en The Practice of Econometrics: Studies on Demand, Forecasting, Money and

Income, R. Heijmans y H. Neudecker, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, pp. 181-189. doi: 10.1007/978-94-009-3591-4_12.

[26] «regression - What does negative R-squared mean?», Cross Validated. <https://stats.stackexchange.com/questions/183265/what-does-negative-r-squared-mean> (accedido 17 de febrero de 2022).

[27] D. Kuhlman, A Python Book: Beginning Python, Advanced Python, and Python Exercises. Platypus Global Media, 2011.

[28] «Scientific computing tools for Python — SciPy.org». <https://www.scipy.org/about.html> (accedido 4 de abril de 2021).

[29] F. Nelli, Python Data Analytics: With Pandas, NumPy, and Matplotlib. Apress, 2018.

[30] D. Kraft, A software package for sequential quadratic programming. Wiss. Berichtswesen d. DFVLR, 1988.

[31] «The 3-Clause BSD License | Open Source Initiative». <https://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause> (accedido 10 de agosto de 2021).

[32] «Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.4.1 documentation». <https://matplotlib.org/stable/> (accedido 4 de abril de 2021).

[33] «Licenses — Matplotlib 3.4.2 documentation». <https://matplotlib.org/stable/devel/license.html#license-discussion> (accedido 10 de agosto de 2021).

[34] C. R. Harris et al., «Array programming with NumPy», Nature, vol. 585, n.º 7825, Art. n.º 7825, sep. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.

[35] J. M. Willman, Beginning PyQt: A Hands-on Approach to GUI Programming. Apress, 2020.

[36] «PyQt5 tutorial 2021: Create a GUI with Python and Qt». <https://build-system.fman.io/pyqt5-tutorial> (accedido 9 de septiembre de 2021).

[37] «Riverbank Computing | Introduction». <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/> (accedido 11 de agosto de 2021).

[38] «The GNU General Public License v3.0 - GNU Project - Free Software Foundation». <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html> (accedido 11 de agosto de 2021).

[39] «pandas - Python Data Analysis Library». <https://pandas.pydata.org/> (accedido 12 de julio de 2021).

[40] A. S. Alberca, «La librería Pandas», Aprende con Alf. <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/pandas/> (accedido 9 de septiembre de 2021).

[41] pandas: powerful Python data analysis toolkit. pandas, 2021. Accedido: 11 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/pandas-dev/pandas/blob/99cf794ae2f63f3137290e7df59b1d31b22ae3d3/LICENSE>

[42] D. P. Jeet y P. Vats, Learning Quantitative Finance with R. Packt Publishing Ltd, 2017.

[43] Abraham. Savitzky y M. J. E. Golay, «Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.», *Anal. Chem.*, vol. 36, n.º 8, pp. 1627-1639, jul. 1964, doi: 10.1021/ac60214a047.

[44] «scipy Tutorial => Using a Savitzky–Golay filter». <https://riptutorial.com/scipy/example/15878/using-a-savitzky-golay-filter> (accedido 5 de octubre de 2021).

[45] M. D. Adams, *Signals and Systems* (Edition 3.0). Michael Adams, 2020.

[46] «Sample Rate Conversion», *Wireless Pi*, 3 de agosto de 2016. <https://wirelesspi.com/sample-rate-conversion/> (accedido 3 de septiembre de 2021).

[47] Power Instruments, *Amtek tr-3000 Operation Manual*, 1086.^a-339 Rev. A ed. Power instruments, 2005.

[48] «Training and Test Sets: Splitting Data | Machine Learning Crash Course». <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/training-and-test-sets/splitting-data?hl=es-419> (accedido 19 de agosto de 2021).

ANEXOS