

Análisis y predicción del consumo eléctrico en un transformador con series de Fourier

Analysis and prediction of electrical consumption in a transformer with Fourier series

Gustavo A. Ruiz¹, Paúl D. Ruiz²

DOI: <https://doi.org/10.61236/ciya.v9i1.1066>

RESUMEN:

La demanda de electricidad es esencial en la planificación de sistemas de energía, y su estimación exacta facilita la optimización de recursos y la prevención de errores en la red. El estudio de series temporales a través de la serie de Fourier [1] se ha resaltado como un instrumento eficiente para desglosar la carga eléctrica en frecuencias, incrementando la exactitud de las proyecciones en contraste con otros procedimientos. Este análisis tiene como objetivo evaluar el desempeño de transformadores empleando series de Fourier [1], estudiando el impacto de elementos como la temperatura y la frecuencia. Además, se pondrán en marcha filtros con el objetivo de mejorar la calidad de las señales eléctricas [2], lo que ayudará a prevenir sobrecargas y a perfeccionar la distribución del peso. Los modelos de predicción fundamentados en este método permitirán realizar estimaciones más exactas del consumo futuro, optimizando la eficiencia del abastecimiento de electricidad y la organización del cuidado [3],[4],[5].

Palabras claves: Predicción, modelos matemáticos, inteligencia artificial, series de Fourier.

Recibido 15 de septiembre de 2024; revisión aceptada 26 de diciembre de 2024

ABSTRACT:

Electric demand is fundamental in the planning of energy systems, and accurate forecasting allows for resource optimization and the prevention of failures in the grid. Time series analysis using Fourier series [1] has emerged as an effective tool for decomposing electrical load into frequencies, improving prediction accuracy compared to other methods. This study proposes to examine the performance of transformers using Fourier series [1], analyzing the influence of factors such as temperature and frequency. Filters will also be implemented to enhance the quality of electrical signals [2], contributing to the prevention of overloads and optimizing load distribution. Predictive models based on this approach will facilitate more

¹ Universidad Internacional de la Rioja, Ecuador, gustavoandres.ruiz267@comunidadunir.net

¹ Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador paulruizd23@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de electricidad es un elemento crucial en la organización y funcionamiento de los sistemas de energía. Una estimación exacta del consumo posibilita maximizar la utilización de recursos, disminuir los gastos operacionales y prevenir errores en la red de distribución. Se han empleado varios modelos matemáticos para estimar la demanda eléctrica, incluyendo métodos de inteligencia artificial y modelos estadísticos. No obstante, el estudio de series temporales a través de las series de Fourier [1] ha probado ser un instrumento eficaz para desglosar el comportamiento de la carga en sus distintas frecuencias, lo que permite la detección de patrones que se repiten a lo largo del tiempo.

Las series de Fourier ofrecen la posibilidad de modelar señales tanto periódicas como no periódicas en el dominio de la frecuencia [1], lo que es particularmente beneficioso en la predicción de la demanda eléctrica de los transformadores. Las investigaciones han demostrado que el uso de este procedimiento incrementa la exactitud de las predicciones en contraposición a métodos convencionales, como los modelos autorregresivos o las redes neuronales [5]. El proceso de descomposición espectral de una señal eléctrica posibilita la identificación de armónicos y la valoración de su influencia en la eficacia del sistema de red [4].

Además, la implementación de filtros se transforma en un componente esencial para mejorar la calidad de la señal eléctrica [2]. Los filtros contribuyen a disminuir armónicos y ruidos que podrían perjudicar la eficiencia del transformador, optimizando de esta manera la estabilidad del sistema. Con MATLAB [3], es posible poner en práctica algoritmos de filtrado sofisticados que facilitan una visualización y análisis más efectivos de las señales eléctricas, favoreciendo la detección de patrones y la mejora del desempeño del sistema.

Este análisis examina el uso de las series de Fourier y métodos de filtrado para prever la demanda eléctrica de un transformador. Se valorará el rendimiento de estos procedimientos frente a otros modelos predictivos y se mostrará una descomposición espectral de la demanda registrada en un periodo específico, corroborando la exactitud del modelo en la predicción de la carga futura. Mediante la utilización de series de Fourier y filtros [1][2], es posible efectuar proyecciones más exactas de la demanda futura, previniendo sobrecargas y optimizando la eficiencia del abastecimiento de electricidad. Esta perspectiva no solo contribuye a la

CIYA. Ciencias de la ingeniería y Aplicadas, vol. 9 N° 1, enero-junio de 2025, pp. 41-53

organización del mantenimiento, sino que también perfecciona la repartición de la carga, disminuyendo gastos y potenciando la estabilidad del sistema.

Objetivo general

Examinar el desempeño eléctrico de transformadores a través de la serie de Fourier, con el objetivo de modelar y prever su rendimiento. Elaborar un método para examinar y perfeccionar las señales eléctricas, teniendo en cuenta elementos como la carga, la temperatura y la frecuencia, y utilizando métodos de filtrado para mejorar la calidad de la señal.

Objetivo específico:

- Analizar el desempeño energético del transformador bajo diversas circunstancias de carga, reconociendo los elementos que influyen en su eficacia.
- Emplear series de Fourier para desglosar y examinar las señales de corriente y voltaje, con el objetivo de identificar armónicos y distorsiones en la señal eléctrica.
- Examinar la correlación entre los cambios en el uso de energía y elementos externos como la temperatura, la carga y la frecuencia, para entender su influencia en la calidad de la energía.
- Elaborar y poner en marcha un filtro para potenciar la calidad de la señal eléctrica, disminuyendo armónicos e interferencias que perjudican el desempeño del transformador.
- Fomentar la validación de modelos predictivos del consumo eléctrico a través de un estudio comparativo con datos experimentales, garantizando su eficacia en la supervisión y administración del uso de energía.

2. METODOLOGÍA

La Figura 1 presenta el esquema de flujo que ilustra el procedimiento para el estudio y pronóstico del uso eléctrico en un transformador. El procedimiento se inicia con la recolección de información sobre el uso eléctrico del transformador, donde se recolectan las señales pertinentes [2].

A continuación, se lleva a cabo un estudio de la señal en el ámbito temporal y frecuencial, empleando la Transformada de Fourier para representar las propiedades de la señal [1]. Posteriormente, se realiza la elección del tipo de filtro apropiado basándose en las propiedades del consumo eléctrico y su variabilidad [5].

Una vez escogido el filtro, se aplica a la señal con la finalidad de modificar o erradicar las variaciones no deseadas, facilitando así una reconstrucción más eficiente de la señal procesada

[4]. Luego, se contrastan los resultados logrados con los datos iniciales a través de diversas representaciones gráficas y cálculos, con el fin de determinar si los datos obtenidos cumplen con los previstos. Para este análisis, se emplea **MATLAB** como herramienta de simulación y procesamiento de señales [3].

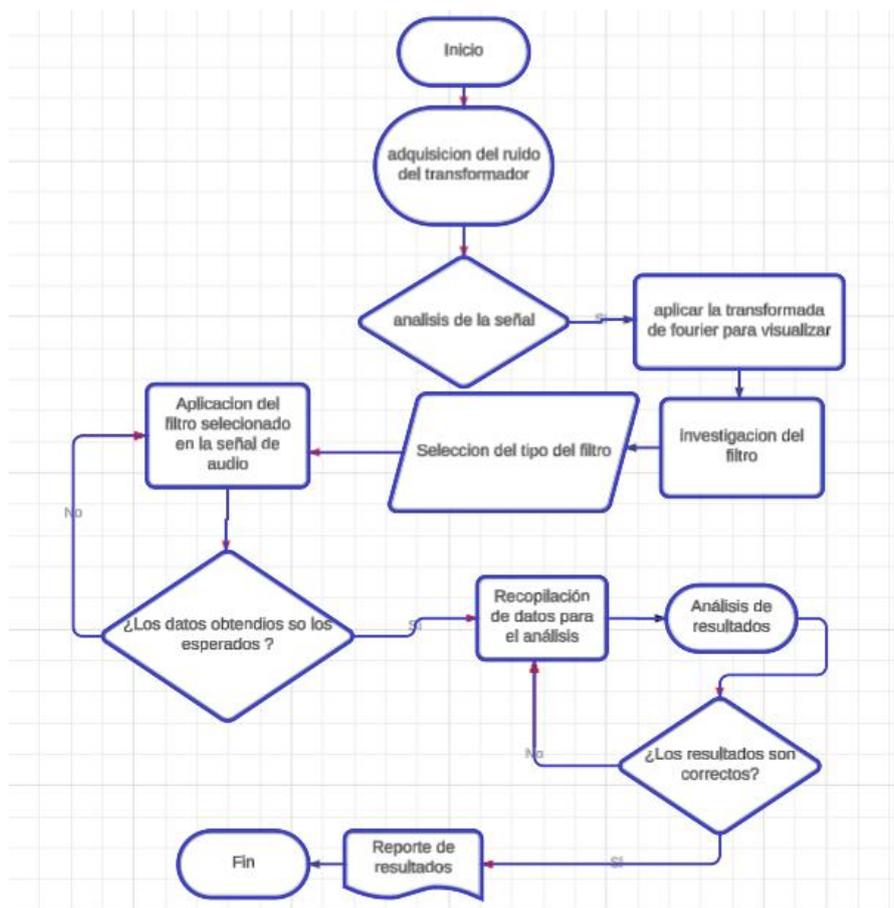


Figura 1. Proceso de simulación y procesamiento de señales.

2.1. Descripción del Enfoque y Metodología General.

El presente estudio se centra en un análisis matemático y experimental del consumo eléctrico en un transformador, utilizando series de Fourier como herramienta principal para el modelado de las señales eléctricas [1]. Este enfoque permite descomponer las señales complejas en sus componentes armónicas, lo que es esencial para identificar no solo distorsiones, sino también patrones en el consumo que pueden ser indicativos de condiciones operativas o problemas en el sistema.

Tipo de Estudio

Cuantitativo: Se recogen datos medibles que permiten realizar análisis estadísticos y matemáticos. Esto incluye no solo las mediciones de voltaje y corriente, sino también la evaluación de la distorsión y otros parámetros eléctricos [2].

CIYA. Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, vol. 9 N° 1, enero-junio de 2025, pp. 41-53

Experimental: El estudio implica la realización de experimentos donde se registran las condiciones de operación del transformador, permitiendo la obtención de datos en un entorno controlado. Esto es crucial para validar los modelos matemáticos [4].

Analítico: Se utilizan herramientas matemáticas para interpretar los datos obtenidos. El análisis ofrece insights sobre el comportamiento del consumo eléctrico y permite realizar predicciones basadas en patrones históricos [5].

2.2. Recopilación y Procesamiento de Datos.

Fuentes de Datos

- Mediciones de Corriente y Voltaje: Se utilizarán sensores de alta precisión conectados al transformador para medir en tiempo real las variaciones de corriente y voltaje. Estas mediciones son esenciales para entender el flujo energético y detectar variaciones que pueden indicar problemas [2].
- Datos Históricos de Consumo Eléctrico: Se recopilarán registros de consumo eléctrico a lo largo del tiempo. Estos datos ayudan a identificar patrones estacionales o cambios en la demanda que pueden influir en el análisis [5].

Herramientas y Software

- MATLAB: Se empleará para realizar análisis de señales, simulaciones y visualización de datos. MATLAB es especialmente útil por su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y su amplia gama de herramientas para el procesamiento de señales [3].
- Python: Este lenguaje de programación se utilizará como alternativa, aprovechando bibliotecas como NumPy y SciPy para análisis numérico y Pandas para la manipulación de datos.
- Equipos de Medición: Se utilizarán instrumentos como pinzas amperimétricas, osciloscopios y multímetros para asegurar la precisión de las mediciones [2].

2.3. Análisis de la Señal y Clasificación

Tipo de Señal

En el contexto del análisis de consumo eléctrico en transformadores, las señales relevantes son principalmente:

- Señales de Corriente: Representan la cantidad de electricidad que fluye a través del transformador. Pueden ser periódicas, especialmente en sistemas de corriente alterna (CA), donde la forma de onda es típicamente sinusoidal [2].

CIYA. Ciencias de la ingeniería y Aplicadas, vol. 9 N° 1, enero-junio de 2025, pp. 41-53

- Señales de Voltaje: Indican la presión eléctrica en el sistema. Al igual que las señales de corriente, las señales de voltaje en sistemas de CA son generalmente sinusoidales [5].

Distorsiones: En la práctica, estas señales pueden no ser perfectamente sinusoidales. La presencia de cargas no lineales (como motores eléctricos, convertidores de frecuencia y dispositivos electrónicos) puede introducir armónicos, que son múltiplos de la frecuencia fundamental. Esto resulta en una señal distorsionada que puede afectar el rendimiento del transformador [4].

Análisis de Fourier

- Descomposición de la Señal: La Transformada de Fourier se aplicará para descomponer las señales en sus componentes armónicas. Esto permitirá identificar las frecuencias predominantes que afectan el consumo y detectar cualquier distorsión que pueda influir en la eficiencia del transformador [1].
- Identificación de Distorsiones: Analizar las frecuencias armónicas puede revelar problemas en el sistema eléctrico, como los efectos de cargas no lineales. Esto es importante para la salud a largo plazo del transformador y para la calidad de la energía suministrada [5].

2.4. Implementación del Filtro

Tipo de Filtro

- Filtro Pasa Bajos: Este filtro se utilizará para eliminar el ruido de alta frecuencia que puede interferir con la señal útil [4]. Al eliminar el ruido, se espera mejorar la claridad de las mediciones de corriente y voltaje.
- Filtro Notch: Este tipo de filtro se diseñará para eliminar armónicos específicos que afectan la calidad de la señal, como los armónicos de 50 Hz o 150 Hz, que son comunes en sistemas de distribución eléctrica [5].

Justificación del Filtro

La aplicación de estos filtros es crucial para asegurar que las señales que se analizan son representativas del comportamiento real del sistema. Los filtros ayudan a proteger los equipos y mejorar la calidad general de la señal, lo que es fundamental para realizar un análisis efectivo y preciso [4].

Implementación

La implementación del filtro se llevará a cabo mediante programación en MATLAB o Python, donde se ajustarán los parámetros del filtro basándose en los datos obtenidos [3]. También se puede optar por un diseño de hardware que integre filtros analógicos, dependiendo de la configuración del sistema.

2.5. Validación y Evaluación de Resultados

Evaluación de la Mejora de la Señal

- **Comparación Visual:** Se utilizarán gráficos para comparar la señal antes y después del filtrado [5]. Esto permitirá una evaluación directa de la efectividad de los filtros aplicados.
- **Medidas de Distorsión Armónica Total (THD):** Se calculará el THD antes y después del filtrado para cuantificar la mejora en la calidad de la señal [4]. Un THD más bajo indica una señal más limpia y cercana a la forma de onda ideal.

Pruebas de Predicción del Consumo

Las pruebas de predicción se realizarán utilizando modelos estadísticos y de machine learning, que serán alimentados por la señal mejorada. Esto permitirá evaluar la precisión del modelo y su aplicabilidad en la predicción de futuros consumos eléctricos [5]. La capacidad de predecir el consumo energético es crucial para la gestión eficiente de recursos y la planificación energética.

Fórmulas de Fourier

La Transformada de Fourier se usa para analizar señales y está dada por la ecuación (1)[1]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Donde:

$X(f)$ es la representación de la señal en el dominio de la frecuencia.

$x(t)$ es la señal en el dominio del tiempo.

f es la frecuencia.

j es la unidad imaginaria.

La Transformada Inversa de Fourier permite recuperar la señal original a partir de sus componentes frecuenciales observaremos en la ecuación (2)[1]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

2.6. filtros utilizados

- **Filtro de Suavizado (Media Móvil)**

Filtro de media móvil (Moving Average Filter): calculando el promedio de un número determinado de muestras adyacentes (ventana), lo que reduce el ruido de alta frecuencia sin alterar demasiado la señal.

El filtro de media móvil es una técnica simple que calcula el promedio de un número determinado de muestras adyacentes, conocido como ventana. Este método es eficaz para reducir el ruido de alta frecuencia sin alterar significativamente la señal original [4]. Existen varias variantes, como la media móvil simple, ponderada y exponencial. Este filtro es ampliamente utilizado en análisis de series temporales, finanzas y procesamiento de señales, ya que suaviza fluctuaciones y revela tendencias subyacentes. Sin embargo, aunque es fácil de implementar, puede introducir un desfase en la señal y no es efectivo para eliminar todos los tipos de ruido.

- **Filtro Butterworth Pasa Bajo**

Filtro pasa bajo de Butterworth (Low-pass Butterworth Filter): permite el paso de frecuencias por debajo de un valor de corte y atenúa las superiores, ofreciendo una respuesta suave sin ondulaciones en la banda pasante [5].

El filtro pasa bajo de Butterworth permite el paso de frecuencias por debajo de un valor de corte, atenuando las superiores. Se caracteriza por su respuesta en frecuencia suave y monótona, lo que lo convierte en una opción popular en aplicaciones de audio, procesamiento de imágenes y sistemas de control. Este filtro es especialmente útil para eliminar ruido de alta frecuencia, conservando la forma de la señal en la banda pasante. Sin embargo, su atenuación no es tan abrupta como en otros filtros, como el Chebyshev, lo que puede ser una limitación en ciertos contextos.

- **Filtro Butterworth Pasa Alto**

Filtro pasa alto de Butterworth (High-pass Butterworth Filter): deja pasar frecuencias por encima de un valor de corte y atenúa las inferiores [5].

El filtro pasa alto de Butterworth deja pasar frecuencias por encima de un valor de corte, atenuando las inferiores. Este tipo de filtro es similar a la pasa bajo, pero está diseñado para permitir el paso de componentes de alta frecuencia. Es comúnmente utilizado en audio para eliminar ruidos de baja frecuencia, así como en instrumentos de medición y procesamiento de señales. Aunque proporciona una respuesta estable en la banda pasante y elimina

componentes no deseadas, puede permitir que pase ruido en la banda alta si no se ajusta adecuadamente.

- **Filtro Butterworth Pasa Banda**

Filtro pasa banda de Butterworth (Band-pass Butterworth Filter): permite el paso de frecuencias dentro de un rango específico y elimina el resto [5], combinando un filtro pasa bajo y uno pasa alto.

El filtro pasa banda de Butterworth combina las características de los filtros pasa bajo y pasa alto, permitiendo el paso de un rango específico de frecuencias y eliminando el resto. Este filtro es útil cuando se desea analizar solo una banda específica de frecuencias, y su diseño puede ser complejo, dependiendo de las especificaciones requeridas. Es común en comunicaciones y análisis de señales, ya que aísla las componentes de interés y elimina el ruido fuera de ese rango, mejorando la calidad del análisis.

- **Filtro Notch (Rechaza Banda)**

Filtro Notch o Filtro Rechaza Banda (Notch Filter / Band-stop Filter): Elimina una frecuencia específica y deja pasar el resto, siendo efectivo para eliminar interferencias de frecuencia fija, como las de corriente alterna [5].

El filtro Notch, también conocido como filtro rechaza banda, está diseñado para eliminar una frecuencia específica, lo que lo hace muy eficaz contra interferencias constantes, como las de corriente alterna. Este filtro se utiliza en sistemas de audio, procesamiento de señales biomédicas y en comunicaciones para eliminar ruidos de fondo. Su capacidad para eliminar interferencias sin afectar otras frecuencias es una gran ventaja, aunque puede introducir distorsiones en las frecuencias cercanas a la frecuencia de corte. Si la frecuencia de interferencia no se conoce con precisión, su efectividad puede verse comprometida.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La señal presentada en la Figura 2 representa el consumo eléctrico de un transformador en su estado natural, sin la influencia de ruido externo. Su forma limpia y bien definida permite extraer información relevante para el análisis y predicción del consumo energético. Mediante la descomposición en series de Fourier, es posible representar esta señal como una combinación de frecuencias, lo que facilita la identificación de patrones y la optimización del rendimiento del transformador [1]. Este enfoque permite realizar predicciones más precisas, mejorar la eficiencia del sistema eléctrico y detectar posibles anomalías en la red [4].

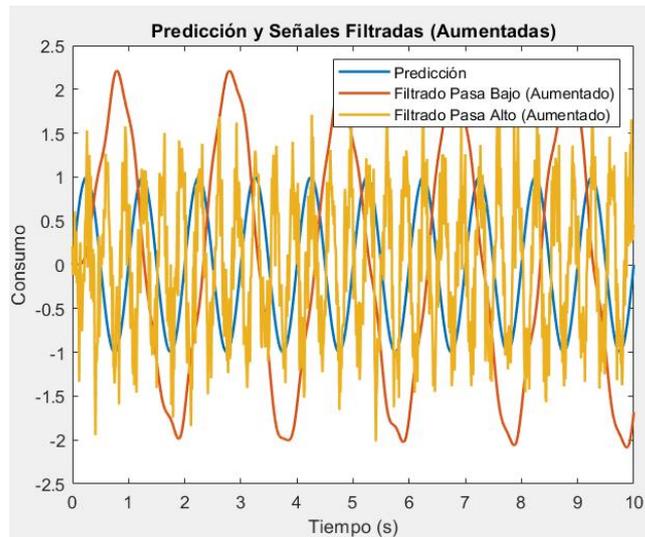


Figura 2. Consumo eléctrico de un transformador en su estado natural.

Para la figura 4 se muestra la ampliación de la transformada inversa Fourier el cual ayuda a reducir de gran manera la cantidad de ruido externo que posee esta [5].

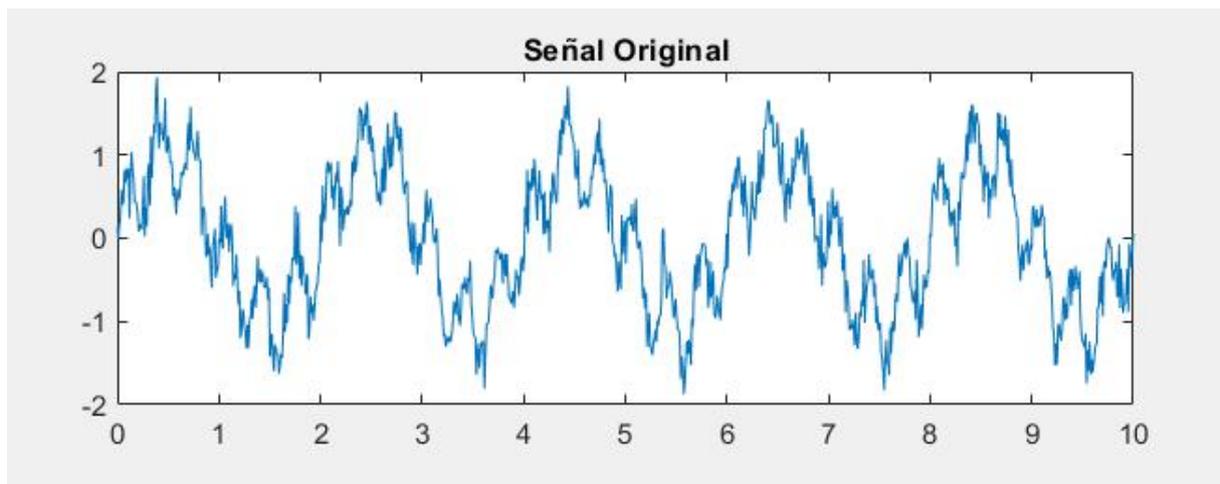


Figura 3. Ampliación de la transformada inversa Fourier.

La figura 4 muestra el proceso de filtrado aplicado a una señal de consumo eléctrico en un transformador, permitiendo mejorar su calidad mediante diferentes tipos de filtros digitales. Se observan seis gráficos, cada uno representando una etapa en el procesamiento de la señal [4].

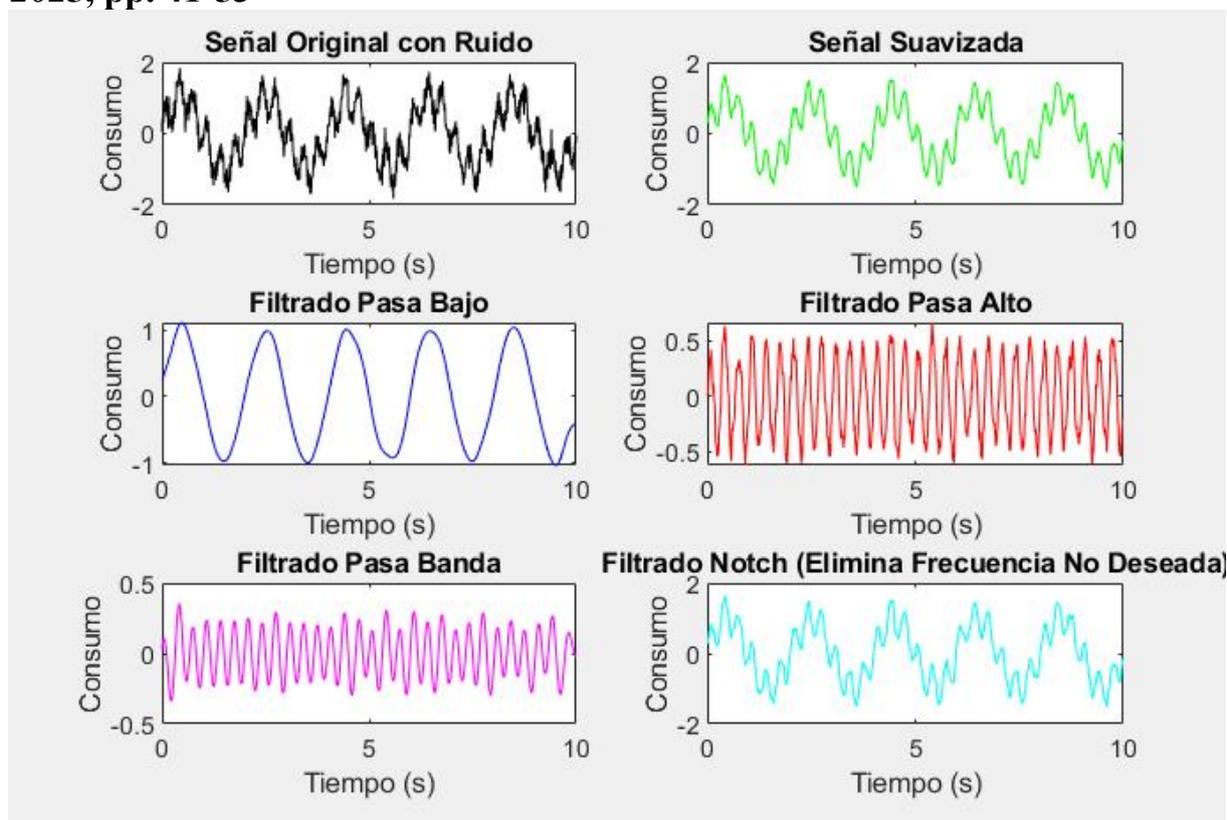


Figura 4. Señales mejores.

Análisis

Frecuentemente, la demanda eléctrica se ve influenciada por ruidos y variaciones que complican el estudio exacto de la carga. Estos ruidos pueden surgir de varias fuentes, tales como interrupciones eléctricas o fluctuaciones en la carga. Para incrementar la calidad de la información, se emplean diversos filtros, cada uno creado para tratar problemas particulares en la señal [3].

El filtro de media móvil suaviza la señal mediante la determinación del promedio de las muestras cercanas, lo que disminuye el ruido de alta frecuencia y posibilita que los filtros subsiguientes operen sobre una versión más estable de la misma. No obstante, puede generar una discrepancia y no erradicar todos los tipos de ruido [4].

El paso bajo el filtro de Butterworth facilita el flujo de frecuencias bajas, disminuyendo las altas, lo que contribuye a eliminar ruidos indeseables y mantener la forma de la señal en la banda pasante. Es fundamental para detectar patrones en la demanda de electricidad. En cambio, el filtro pasa alto suprime elementos de baja frecuencia, como los desplazamientos DC, lo que permite un enfoque más preciso en las fluctuaciones rápidas de la carga [5].

El filtro pasa banda fusiona las características de los filtros pasa bajo y pasa alto, facilitando la transmisión de un espectro de frecuencias determinado. Esto resulta beneficioso para separar

CIYA. Ciencias de la ingeniería y Aplicadas, vol. 9 N° 1, enero-junio de 2025, pp. 41-53

elementos importantes de la señal de carga y eliminar el ruido que exceda ese espectro [3]. Finalmente, el filtro Notch se enfoca en erradicar frecuencias concretas, como interferencias ininterrumpidas, sin perjudicar el resto de la señal, lo que incrementa la claridad en el estudio de la demanda eléctrica [4].

En resumen, el uso de estos filtros facilita la obtención de una señal más homogénea y completa, lo que simplifica la detección de patrones y la exactitud en las proyecciones vinculadas a la carga eléctrica, lo cual es esencial para una administración energética eficaz [1].

Discusión

Los filtros resultan fundamentales en el estudio de la demanda eléctrica, pues contribuyen a mejorar la calidad de los datos al disminuir el ruido y las interferencias. El filtro de media móvil es uno de los más empleados, ya que suaviza la señal al combinar muestras cercanas, y el filtro Butterworth, que puede ser de paso bajo, alto, banda o notch. Cada uno posee atributos particulares que facilitan la eliminación de diversos tipos de ruido, tanto de alta como de baja frecuencia [5].

Es fundamental el uso correcto de estos filtros para preservar la integridad de la señal. Un filtro excesivamente severo puede suprimir frecuencias significativas que resultan pertinentes para el estudio de la carga eléctrica. Por esta razón, es aconsejable tener en cuenta filtros adaptativos que modifiquen su reacción en tiempo real, maximizando la disminución del ruido sin comprometer la calidad del espectro [3].

Además, la implementación de técnicas de procesamiento complementarias, tales como la ecualización y algoritmos sofisticados de disminución de ruido, puede incrementar significativamente la transparencia de los datos. Estos métodos no solo aspiran a reducir el ruido, sino también a mantener y fortalecer los patrones relevantes en la demanda eléctrica, posibilitando de esta manera un análisis más exacto y eficaz [4].

4. CONCLUSIONES

- Se demostró que la eficiencia del transformador fluctúa en función de la carga, mostrándose más eficaz en situaciones ideales y mostrando una disminución en su eficiencia bajo situaciones de carga excesiva o insuficiente.
- El estudio a través de la serie de Fourier posibilitó la identificación de armónicos y distorsiones en la señal eléctrica, resaltando su influencia en la estabilidad del sistema de energía.

CIYA. Ciencias de la ingeniería y Aplicadas, vol. 9 N° 1, enero-junio de 2025, pp. 41-53

- Se verificó que el uso de energía se ve afectado por elementos como la temperatura y la frecuencia, los cuales inciden en la calidad de la energía proporcionada.
- La aplicación de filtros condujo a la mejora de la señal eléctrica, disminuyendo armónicos y ruido, lo que consecuentemente potencia el desempeño del transformador.
- Los modelos predictivos fundamentados en series de Fourier demostraron gran exactitud al prever variaciones en el consumo de energía, corroborando su eficacia para la supervisión y administración eficaz de la energía.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Ceschi y J. Gautier, Fourier Analysis. London, England: Wiley, 2017. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utcotopaxi/titulos/177709>

[2] G. E. Campos Hernández, Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica. Bogotá: Universidad Manuela Beltrán, 2009. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utcotopaxi/titulos/24947>

[3] L. Agud Albesa y M. L. Pla Ferrando, Matlab para matemáticas en ingenierías. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2016. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utcotopaxi/titulos/57407>

[4] J. E. González-Barajas, C. C. Velandia, J. Lyma-Guaqueta y P. Ospina-Fuentes, «Análisis espectral a través de bancos de filtros aplicado al pre-procesamiento para la umbralización de señales de pulso oximetría,» Tecno Lógicas, vol. 19, n° 34, p. 15, 2016.

[5] J. C. M. Morales, J. C. P. Ortega, J. M. R. Arreguín y J. E. V. Soto, «Comparación de filtros para el análisis del espectro espacial bidimensional de Fourier, en el proceso de digitalización 3D,» Universidad Autónoma de Querétaro, p. 13, 2017.