

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA  
CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE  
UN AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN DE  
DOBLE ALIMENTACION**





**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA  
CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE  
UN AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN DE  
DOBLE ALIMENTACION.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: RENÉ ALEXANDER MOLINA TAIPICAÑA  
TUTOR: SILVANA FABIOLA VARELA CHAMORRO

Quito -Ecuador  
2023

René Alexander Molina Taipicaña

**“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE UN AEROGENERADOR DE INDUCCION DE DOBLE ALIMENTACION.”**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**René Alexander Molina Taipicaña** (Y'1998 – M'05). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Instituto Tecnológico Superior “Sucre” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el diseño de un filtro activo para el control de armónicos a la salida de un aerogenerador de inducción de doble alimentación.  
[rmolinat@est.ups.edu.ec](mailto:rmolinat@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Silvana Fabiola Varela Chamorro** (Y'1975 – M'02). Se graduó de Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2001 y de Master en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente se encuentra trabajando como docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Transitorios Eléctricos, Sistemas de Distribución.  
[svarela@ups.edu.ec](mailto:svarela@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2023 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, René Alexander Molina Taipicaña con documento de identificación N° 1726699752 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 10 abril del 2023

Atentamente,



René Alexander Molina Taipicaña

1726699752

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

Yo, René Alexander Molina Taipicaña con documento de identificación No. 1726699752, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Diseño de un filtro activo para control de armónicos a la salida de un aerogenerador de inducción de doble alimentación”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 10 de abril del año 2023

Atentamente,



René Alexander Molina Taipicaña

1726699752

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Silvana Fabiola Varela Chamorro con documento de identificación N° 1713565818, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE UN AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN DE DOBLE ALIMENTACIÓN, realizado por René Alexander Molina Taipicaña con documento de identificación N° 1726699752, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de abril del año 2023

Atentamente,



---

Ing. Silvana Fabiola Varela Chamorro MS.c  
1713565818

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción.....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Elementos de la energía eólica .....	3
2.2	Sistema eléctrico de distribución.....	3
2.2.1	Estabilización de la red de distribución.....	4
2.3	Origen de armónicos .....	4
2.3.1	Distorsión de armónicos .....	4
2.4	Filtros activos de potencia .....	5
2.4.1	Tipos de filtros activos de potencia.....	6
2.4.2	Sistema de identificación para filtros activos .....	6
2.4.3	Modulación para filtros activos .....	7
2.5	Criterios que rigen la calidad de energía .....	7
2.5.1	Calidad de energía eléctrica .....	7
2.6	Planteamiento del problema. ....	8
3	Desarrollo.....	8
3.1	Implementación de Carga no lineal .....	8
3.2	Diseño de filtro activo de potencia en serie.....	8
3.2.1	Control para filtro activo de potencia en serie.....	9
4	Análisis de resultados.....	10
4.1	Análisis de resultado solo del sistema de 37 barras .....	10
4.2	Análisis en barra 740 con carga no lineal de 500W y DFIG.....	11
4.2.1	Análisis en barra 740 con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro.....	12
4.2.2	Análisis en barra 740 con carga no lineal de 900W y DFIG.....	13
4.2.3	Análisis en barra 740 con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro.....	14
5	Conclusiones.....	15
5.1	Trabajos futuros .....	16
6	Referencias.....	16
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	19
6.2	Resumen de Indicadores.....	21
7	Anexos.....	23



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un aerogenerador con DFIG.....	3
Figura 2. Sistema de distribución.....	3
Figura 3. Diagrama de estabilidad y clasificación.....	4
Figura 4. Onda con presencia de distorsión armónica.....	5
Figura 5. Filtros activos de potencia.....	5
Figura 6. Filtro en serie.....	6
Figura 7. Filtro en paralelo.....	6
Figura 8. Diagrama de la calidad de energía.....	8
Figura 9. Pseudocódigo del proceso.....	8
Figura 10. Diagrama de bloques del subsistema que contiene el control del filtro serie.....	9
Figura 11. Diagrama de bloques del control del filtro serie.....	9
Figura 12. Esquema del circuito de potencia del filtro serie.....	10
Figura 13. Filtro activo diseñado con su control y aplicado al sistema.....	10
Figura 14. Esquema del sistema de prueba de 37 barras Bus Test Feeder.....	11
Figura 15. Señal de onda de voltaje del sistema.....	11
Figura 16. Análisis FFT en sistema equilibrado.....	11
Figura 17. Onda del sistema con carga no lineal de 500W y DFIG en la barra 740.....	12
Figura 18. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 500W y DFIG.....	12
Figura 19. Onda del sistema con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro en la barra 740.....	12
Figura 20. Corrección del filtro para la carga no lineal de 500W y DFIG en barra 740.....	13
Figura 21. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro.....	13
Figura 22. Onda del sistema con carga no lineal de 900W y DFIG en la barra 740.....	13
Figura 23. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 900W y DFIG.....	14
Figura 24. Onda del sistema con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro en la barra 740.....	14
Figura 25. Corrección del filtro para la carga no lineal de 900W y DFIG en la barra 740.....	14
Figura 26. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro.....	15
Figura 27. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.....	22
Figura 28. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.....	22
Figura 29. Indicador de solución – Estado del arte.....	22
Figura 30. Sistema de 37 barras con DFIG, carga no lineal y filtro en barra 740.....	25

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz del estado de arte.....	19
Tabla 2: Parámetros para implementación de un SEP.....	23
Tabla 3: Nivel de armónicos impares según la norma IEEE 50160.....	23
Tabla 4: Nivel de armónicos pares según la norma IEEE 50160.....	23
Tabla 5: Nivel máximo de THD según la norma IEEE 5016.....	23
Tabla 6: Nivel de armónicos según norma IEEE 519.....	24

# DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE UN AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN DE DOBLE ALIMENTACIÓN

## Resumen

El objetivo principal de este artículo es el control de armónicos y reducción de THD, generado por la implementación de una carga no lineal y de un aerogenerador de inducción de doble alimentación, con la ayuda de la simulación y análisis de un filtro activo diseñado netamente para la reducción de armónicos a la salida de un aerogenerador de inducción de doble alimentación conectado en un sistema eléctrico de potencia de 37 barras IEEE. El análisis se realizó comparando artículos que tienen como objetivo reducir armónicos implementando filtros híbridos, lo cual se analizó y se pudo llegar a la conclusión de que el filtro presentado a continuación cumple de mejor manera con la reducción de los mismos y por ende corrige la distorsión armónica total sin tener la robustez de un filtro híbrido. Las ventajas de la implementación de los filtros activos son eliminar inductancias pesadas y de elevado costo, de igual manera permiten el diseño de etapas complejas utilizando pasos simples para su funcionamiento y pueden acoplarse a impedancias sin necesidad de otros elementos para su sintonización. En la implementación del filtro se presenta dos escenarios específicos que son los siguientes: estudio en estado estable y estudio en estado transitorio. El presente artículo contribuye al estudio de la problemática de distribución con la implementación de generación eólica, dando un aporte más viable y sencillo.

**Palabras Clave:** Filtro activo, armónicos, distorsión armónica, red de distribución, energía eólica.

## Abstract

The main objective of this article is the control of harmonics and reduction of THD, generated by the implementation of a non-linear load and a double-feed induction wind turbine, with the help of the simulation and analysis of an active filter designed purely for the reduction of harmonics at the output of a double-fed induction wind turbine connected in a system IEEE 37 bar electric power. The analysis was carried out by comparing articles that aim to reduce harmonics by implementing hybrid filters, which was analyzed, and it was possible to conclude that the filter presented below better complies with the reduction of harmonics and therefore corrects the total distortion harmonic without having the robustness of a hybrid filter. The advantages of the implementation of active filters are to eliminate heavy and expensive inductances. In the same way, they allow the design of complex stages using simple steps for their operation, and they can be coupled to impedances without the need for other elements for their tuning. In the implementation of the filter, two specific scenarios are presented, which are the following: a study in a stable state and a in a transient state. This article contributes to the study of distribution problems with the implementation of wind generation, giving a more viable and straightforward contribution.

**Keywords:** Active filter, harmonics, harmonic distortion, distribution network, wind energy.

# 1 Introducción

La industria eléctrica se ha visto sometida a procesos a gran escala de desarrollo con el pasar de los años, todo esto gracias al avance tecnológico al cual el mundo se ha visto sumergido [1].

Así mismo como el sector eléctrico ha atravesado grandes cambios evolutivos, el crecimiento de afectaciones también se ha visto perjudicado, una problemática actual es la existencia de armónicos en el sistema, lo cual ocasiona pérdidas en el sector industrial, comercial y residencial [1].

Un equipo inductivo como lo es un aerogenerador de inducción de doble alimentación es una máquina eléctrica asíncrona [2]. Ésta varía de forma sincrónica el flujo de voltaje, la frecuencia y el par, ya que la frecuencia de alimentación y la tensión tienden a modificarse [2].

La implementación de un aerogenerador de inducción de doble alimentación accede a un análisis para la visualización de su comportamiento dentro del sistema eléctrico de potencia [3].

Como solución para lo antes indicado se proyecta un modelado el cual plantea la construcción de un FAP en serie exclusivamente a fin de controlar armónicos dentro de la red de 37 barras IEEE [4].

Este tipo de afectación sucede por la implementación de un aerogenerador de inducción de doble alimentación y de igual manera ocurre por lo general en sistemas industriales de gran escala [4].

En los mismos se ocupan motores de gran potencia, por variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, hornos de arco, etc. [4].

En general este tipo de perturbación se presenta por el uso de equipos electrónicos que ocupan electricidad de forma no lineal [4].

Los filtros son considerados componentes que permiten el paso de señales eléctricas a través del mismo ya sea con parámetros de frecuencia o una frecuencia predeterminada, de igual manera su funcionamiento les permite cambiar la fase o su amplitud [4].

El filtro activo tiene como principio dentro de la red de distribución la inspección y control de la corriente de flujo en donde se encarga de equilibrar la corriente en relación de las mismas, pero de fase, esta toma de referencia una red trifásica equilibrada [4].

Los filtros activos también tienen como objetivo la mitigación de armónicos y control de THD en el sistema de distribución, esta se podría considerar una de las funciones más importantes de estos filtros [5].

Otra función de este tipo de filtros es la corrección del factor de potencia el cual cambia el coseno de la unidad y como resultado da un valor proporcionado de la tensión entre fases y el neutro [5].

El SEP está compuesto por tres partes importantes, generación, transmisión y distribución. Estos tres sectores deben pasar por parámetros jerárquicos fundamentales ya que su operación es constante [5].

La tabla 1 que se encuentra en anexos muestra que antes de implementar un sistema eléctrico de potencia se debe realizar el debido estudio y seguir los pasos antes de su puesta en marcha [5].

Es muy importante que se sigan estos parámetros ya que no se puede operar sin haber planificado antes o diseñado el SEP. Una vez cumplidos los pasos requeridos para la implementación de una red eléctrica se puede poner a disposición ya sea del sector industrial, comercial o residencial así garantizando una excelente calidad de energía eléctrica para los usuarios [5].

El siguiente documento está conformado por la una estructura dividida en segmentos; Segmento I: introducción, Segmento II:

marco teórico relacionado al concepto de sistema de distribución, componentes, cargas lineales y no lineales, origen de armónicos, y filtros activos; Segmento III: desarrollo del caso de estudio, caso de estudio, modelamiento del aerogenerador utilizado y diseño del filtro activo; Segmento IV: análisis de resultados, Segmento V: conclusiones y referencias y anexos del trabajo.

## 2 Marco teórico

La generación eólica se ha convertido en una fuente renovable muy utilizada en el país, pero que a su vez ha traído consigo problemas nuevos que perjudican a la distribución de energía eléctrica de calidad [6].

Una de la problemática más actual que expone es el origen de armónicos, lo cual hace que el usuario final no goce de una red eléctrica estable [6].

### 2.1 Elementos de la energía eólica

La energía eólica está conformada por una parte eléctrica, mecánica y de control que facilita el uso del viento para que después pase a energía mecánica y así transformarla a energía eléctrica [6].

#### Aerogenerador de inducción de doble alimentación (DFIG)

Este tipo de aerogenerador tiene su conexión directa al tendido eléctrico y tiene la facilidad de funcionar a una velocidad variable por el hecho de que está conformado por un conversor fijo de frecuencia bilateral, que provee una frecuencia fluctuante y un voltaje de magnitud al rotor de del generador de inducción obteniendo elevar su margen de velocidad. La facultad del conversor fijo de frecuencia fija los parámetros de aceleración del rotor [7].

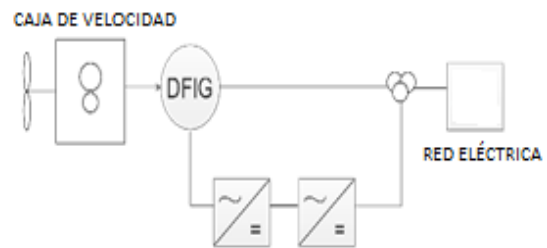


Figura 1. Estructura de un aerogenerador con DFIG [Autor]

### 2.2 Sistema eléctrico de distribución

Los sistemas eléctricos de distribución también son conocidos como redes de distribución eléctrica y son un conjunto de componentes [8].

Sus elementos van desde la subestación de potencia, el sistema de sub transmisión, subestación de distribución, transformadores de distribución y alimentadores primarios y secundarios [8].

Todos estos componentes se encuentran en las redes subterráneas y aéreas y se expanden en grandes localidades donde su función final es la distribución de energía eléctrica al consumidor final [8].

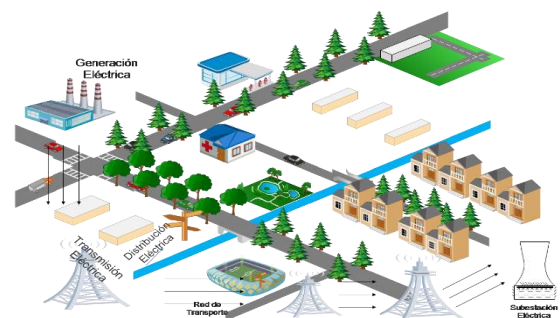


Figura 2. Sistema de distribución [Autor]

En el país las subestaciones de distribución generan voltajes iniciales o predeterminados que pasan por un proceso de transformación para que tengan voltajes operables, ya sea para el sector rural o urbano y son: 4.16kV, 6.3kV, 13.2kv, 13.8kV, 22kV, 22.8kV y 34.5kV [8].

Las líneas eléctricas de distribución son construidas en forma radial para que el flujo de corriente y voltaje tengan una dirección única es decir que vaya desde la red hasta el consumidor final unidireccionalmente, cabe

recalcar que cuando se planifica una mejora para disminuir pérdidas de energía eléctrica se incorporan componentes para que la red siga siendo unidireccional [8].

Se toma en cuenta los avances tecnológicos, ya que hace que las redes se actualicen y así se pueda solucionar o superar fácilmente estos problemas [8].

### 2.2.1 Estabilización de la red de distribución

La estabilidad del sector hace relación con el equilibrio de todos los componentes que conforman el mismo [9].

Un SEP por lo general trabaja óptimamente, pero si con un estudio se visualiza que existiera un desbalance se puede llegar a la conclusión de que el sistema se encuentra inestable y esto hace que se alteren los niveles de voltaje y de corriente [9].

La figura 3 indica que tipos de estabilidad y su clasificación pueden presentar los sistemas eléctricos de potencia [9].

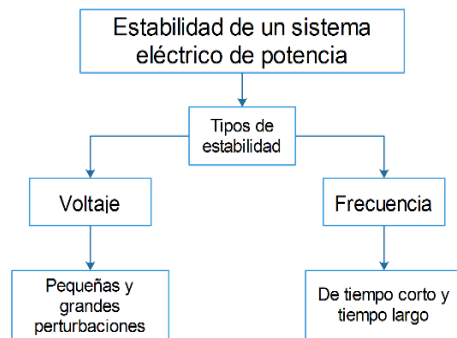


Figura 3. Diagrama de estabilidad y clasificación [Autor]

Un ejemplo claro para distinguir si un sistema eléctrico de potencia es estable o inestable son dentro de un sistema trifásico y se visualiza las variaciones de carga, ya que el tipo de arranque que tienen es muy robusto [10].

La finalidad de esta investigación es ofrecer calidad de energía eléctrica al

consumidor final y esto se obtendrá ofreciendo un sistema estable y equilibrado entre todos los elementos que la componen, esto se obtendrá con la implementación de un filtro activo para la reducción y control de armónicos que existan en la red y de esta forma entregar un sistema óptimo final [10].

## 2.3 Origen de armónicos

Por lo general los armónicos se originan por cargas no lineales, lo que hace referencia a que la impedancia que tienen no es constante y se concluye que están en función de la tensión [11].

También es cierto que su alimentación es mediante una tensión sinusoidal sin embargo las mismas tienden a atraer una magnitud que no es sinusoidal llegando así a que su corriente se encuentre en desfase y que el ángulo  $\phi$  esté en función de la tensión [11].

Es muy habitual tener datos con presencia de distorsiones armónicas en el SEP y generalmente la presencia de los mismos puede darse por cortocircuitos, el arranque de máquinas robustas como motores o aerogeneradores incluso por factores atmosféricos que no dependen del humano, esto produce alteraciones en la operación del sistema y por ende en el funcionamiento general de los elementos o equipos que lo conforman [11].

### 2.3.1 Distorsión de armónicos

La definición de armónicos tiene como principio el concepto del teorema de Fourier en donde dice que por medio de parámetros analíticos tiene la posibilidad de integrarse mediante la suma de funciones sinusoidales, donde la función predeterminada tiene parámetros iniciales tales como el periodo y la frecuencia [12].

La distorsión armónica aparece cuando el voltaje y la corriente presentan afectaciones, esto hace que la forma de onda sinusoidal tenga deformaciones presentando picos que una onda normal no debería presentar [12].

Una de las características de la distorsión armónica es su el voltaje y su forma de onda, por lo que al hablar de la forma de onda se necesita hallar la onda correcta de la misma y cuando se habla del voltaje se requiere que la mal formación de una señal cumpla con valores predeterminados[12].

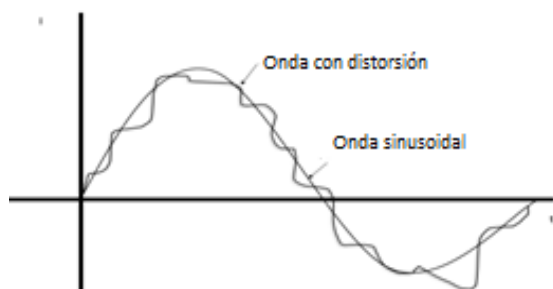


Figura 4. Onda con presencia de distorsión armónica. [Autor]

La estructura de onda tanto de la corriente como del voltaje deben ser las mismas y están en función de una señal periódica de igual forma deben ser constantes, ya que las perturbaciones por la existencia de armónicos son muy frecuentes en el SEP [12]

Existen normas que rigen los límites de distorsión armónica, con lo cual se tiene así mismos parámetros predeterminados de operación en tensión y su comportamiento dentro del sistema eléctrico de potencia [12].

## 2.4 Filtros activos de potencia

El objetivo principal de un filtro activo es la mitigación de armónicos dentro de las redes de generación y distribución del SEP [12].

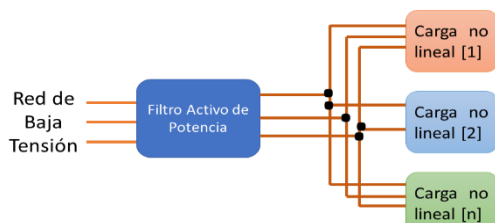


Figura 5. Filtros activos de potencia. [Autor]

Dentro de la red eléctrica existe un crecimiento notable de cargas no lineales la

cual hace que aparezcan problemas muy comunes como lo son las distorsiones y pérdidas de eficiencia, debido a que la red por la conexión de las mismas cargas presenta un factor de potencia muy bajo [13].

Una forma de mejorar el sistema es la implementación de un filtro activo, ya que estudios y análisis previos han ayudado a encontrar diversas construcciones para utilizarlos dentro de la red, así logrando eliminar o mitigar afectaciones que perjudiquen la calidad de energía eléctrica [13].

El criterio de funcionalidad de estos filtros se sustenta en la implementación de un convertor al sistema monofásico o trifásico, según sea el caso [14].

Estos están asimilados por una inductancia donde se almacena energía eléctrica y que tiene la facilidad de compensar corriente mediante un tipo bus de condensadores que cumple la función de una fuente DC y se hace la relación mediante un equipo de potencia como los transistores [14].

Es importante que la corriente y la tensión atribuida a la carga que pase por la red sea de forma sinusoidal y para lograr ambos requerimientos es posible que se utilice diversas topologías de filtros [15].

Hay que mencionar que un filtro activo cuenta con mayor número de ventajas a comparación de un filtro pasivo [16].

Las ventajas van desde la posibilidad de ajustarse a parámetros variables tanto de carga como de la red; La mitigación de resonancias en relación de la red y el filtro; Hasta la reducción de THD mediante la compensación de un factor de potencia bajo [16].

Como ventaja extra este tipo de filtro puede corregir el desfase de las curvas en relación de corriente y tensión o que es más conocido como coseno de  $\phi$  y por ende el equilibrio de fases [16].

Las perturbaciones que existen en la red eléctrica de potencia son de diferente tipo, por ejemplo:

- Presencia de distorsión armónica
- Bajo factor de potencia
- Flicker
- Huecos de tensión
- Desequilibrio de fases

### 2.4.1 Tipos de filtros activos de potencia

El uso de filtros para la mitigación de afectaciones dentro de la red tiende a clasificarse de muchas formas [16].

La clasificación más utilizada es basándose en la conexión entre el filtro y la carga dentro de la red es decir que existen filtros en serie, paralelo o híbridos, cada uno de este tipo de filtros tiene un funcionamiento distinto en la red [16].

#### Filtro activo en serie

El comportamiento de un filtro activo en serie es la de una fuente de voltaje conectada en cadena con la red eléctrica y su principal tarea es que el voltaje en la terminal de la carga sea sinusoidal [16].

Este tipo de filtros suelen utilizarse para la mitigación de armónicos de voltaje en la carga, la mitigación de flicker de voltaje y para regular la tensión [16].

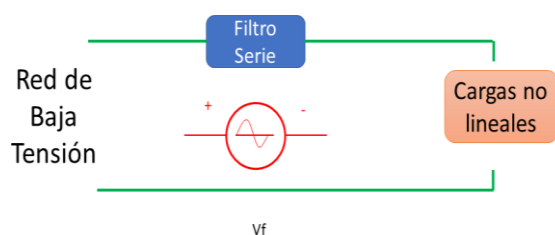


Figura 6. Filtro en serie [Autor]

#### Filtro activo en paralelo

El comportamiento de un filtro activo en paralelo es la de una fuente de corriente y su principal tarea es la mitigación de armónicos de corriente provocados por la carga [16].

Esto se logra sumando las corrientes existentes tanto en la red eléctrica como en la carga, obteniendo así una curva senoidal.

Este tipo de filtros suelen utilizarse para la mitigación de armónicos de corriente, para la reparación del factor de potencia y para el control de fugas de corrientes existentes en el neutro [17].

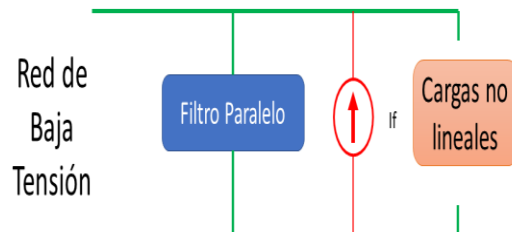


Figura 7. Filtro en paralelo [Autor]

#### Filtro activo mixto

La estructura de un filtro activo mixto se compone de la unión de un filtro en serie y un filtro en paralelo en donde su funcionamiento consiste en que tanto el consumo de corriente y la tensión de la carga sean sinusoidales [18].

### 2.4.2 Sistema de identificación para filtros activos

El diseño de un esquema de control se centra en proyectar un ejemplo físico mediante fórmulas matemáticas básicas, ecuaciones diferenciales o algebraicas [19].

Un modelo determinista este sujeto a un impulso preciso de la estructura, por eso es que nace el requisito de proyectar los parámetros iniciales en rangos continuos para representar la conducta del esquema [19].

La utilización de estos esquemas facilita usar herramientas actuales que controlan y estabilizan las redes con parámetros predeterminados, además de proyectarse a cambios que puedan atravesar por causas externas del sistema, modelar los estados del mismo y el desglose del sistema [20].

Analizando las variables y el impulso del esquema se puede determinar si el sistema se encuentra o no con parámetros iniciales preestablecidos [21].



Generalmente los modelos de los sistemas no son precisos debido a que están sujetas a componentes ajenos y es difícil de dar un análisis matemático, por estas razones se busca utilizar patrones con criterios iniciales, en el que las variables sean de fácil reconocimiento para la utilización de métodos de estimación [21].

El método para la detección de un filtro activo se basa en adquirir un ejemplo que asocie el voltaje que circula por el suministro hasta el convertidor con el voltaje de cada punto y la corriente de cada fase en la red [22].

Este método dejará elaborar un proceso que permita el control de evaluar la corriente implementando una derivación de las fases existentes en la red de distribución, para el control de THD y elevar el factor de frecuencia [22].

#### **2.4.3 Modulación para filtros activos**

La modulación de filtros consiste en facilitar el mando de ejecución de los transistores para adquirir como resultado en la salida una señal de tensión y se puede decir que este es el funcionamiento primordial de este método [23].

#### **Modulación mediante vectores naturales**

El uso de vectores naturales depende de la estructura de permutación de los elementos de potencia, estos poseen grados con la capacidad de entregar un convertidor conmutado [24].

La cantidad de vectores está sujeto al grado de capacidad del convertidor. Por ejemplo, si el convertidor es de primer grado este va a tener tres vectores que son el voltaje en corriente directa positivo, el voltaje en corriente directa negativo y el 0 [25].

La situación de los transistores expresa un valor de los vectores y da como resultado la existencia de cuatro estados conmutados [25].

## **2.5 Criterios que rigen la calidad de energía**

Un objetivo principal de la energía eléctrica es que sea de calidad y esto se logrará, no teniendo interrupciones, que la red no refleje presencia de armónicos, no teniendo huecos de tensión, equilibrio de fases, no tener fugas y sobre todo que el servicio eléctrico sea constante [26].

Estudios previos han encontrado que uno de los inconvenientes más frecuentes que provoca la pérdida eléctrica y económica en empresas distribuidoras es la calidad de la misma, ya que altera la eficiencia de máquinas eléctricas que hacen uso causando así daños, afectaciones y sobre todo un mal desempeño [27].

En el sector industrial, comercial y residencial el mal desempeño de las máquinas puede causar inconvenientes muy serios a corto o largo plazo. En la actualidad las grandes compañías generadoras y distribuidoras deben enfrentarse a una problemática notable e importante [28].

- Elevar la potencia eléctrica tanto de generación como de distribución para abastecer las necesidades del usuario.
- Garantizar el correcto uso de la energía entregada para avalar el adecuado funcionamiento de los componentes que se encuentran dentro de la red eléctrica.

#### **2.5.1 Calidad de energía eléctrica**

El voltaje y la corriente son los criterios esenciales que establecen la entrega de electricidad [29].

Actualmente la calidad y la eficiencia energética son definiciones que van de la mano, es por esto que hay que considerar todos los factores que tengan que ver con estos dos elementos, es decir el aprovechamiento óptimo de la electricidad y la circulación de la misma [29].



Figura 8. Diagrama de la calidad de energía.

[Autor]

La figura 8 muestra que existen dos variables que la calidad de energía eléctrica debe cumplir:

- La primera indica que debe ser capaz de abastecer del servicio sin importar el lugar y las 24 horas de los 365 días del año.
- La segunda hace referencia a la entrega de suministro necesario, es decir voltaje, corriente y frecuencia.

La calidad de energía se encuentra observada bajo tres perspectivas que son la del suministrador el cual observa los parámetros de corriente y voltaje consumido por el cliente y los problemas que presenta la red al ser consumida, del fabricante el cual determina los límites en los equipos para prevenir que los elementos dejen de funcionar y del consumidor el cual ve reflejado la calidad de la energía en sus equipos[29], [30].

## 2.6 Planteamiento del problema.

Debido a que se ha visto un crecimiento notable en la implementación de cargas no lineales en el sistema eléctrico de potencia, la implementación de este tipo de cargas ha provocado la presencia de armónicos y por ende el aumento de la distorsión armónica total.

Por esta razón se propone diseñar e incorporar un filtro activo de potencia para que sea simulado junto a un sistema de 37 barras IEEE y un aerogenerador de inducción de doble alimentación (DFIG), para colaborar en la reducción del THD utilizando el software Matlab/Simulink.

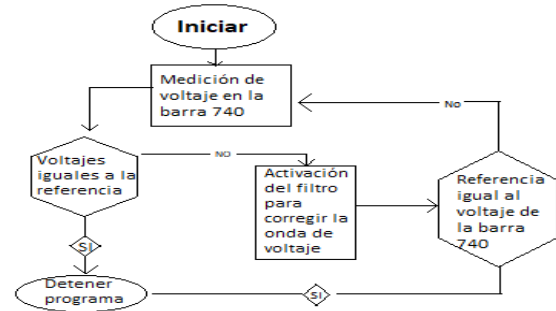


Figura 9. Pseudocódigo del proceso [Autor]

## 3 Desarrollo

Para el desarrollo del problema se inyectó la perturbación provocada por una carga no lineal en un SEP de prueba de 37 barras, la implementación de la carga no lineal causa afectaciones a la red y de esta manera se logra generar armónicos que perjudican la calidad de energía eléctrica.

### 3.1 Implementación de Carga no lineal

Para que el sistema presente una falla se implementó una carga no lineal con dos parámetros distintos una con 500W y la segunda con 900W dentro del subsistema DFIG, de esta manera el sistema general contará con la presencia de THD.

La carga no lineal implementada consta internamente con elementos electrónicos como el diodo, un transistor e IGBT.

Su descomposición en serie de Fourier de las señales distorsionadas está basada con los siguientes parámetros.

$$T_{base} = 20ms \quad (1)$$

$$f_{base} = 50Hz \quad (2)$$

### 3.2 Diseño de filtro activo de potencia en serie

Este tipo de filtro se diseñó con el fin de reducir los armónicos generados por una falla en el sistema. El filtro por ser diseñado e implementado en serie actúa sobre el voltaje del sistema y de esta forma reduce la distorsión armónica total.

### 3.2.1 Control para filtro activo de potencia en serie

La figura 10 es el bloque que contiene a la figura 11 y la figura 11 es el control del filtro diseñado.

Primero para el diseño del filtro se necesitó una referencia, es decir que el filtro va a compensar mediante esta referencia para que se comparen. Después a partir de un  $V_{abc}$  que es un voltaje inicial y con un multiplexor divide las tres fases al igual que la referencia, es decir que ingreso la referencia y se resta lo que está entrando así para las tres fases.

El Mag Fourier Phase se utilizó para marcar el tiempo y visualizar que frecuencias son las que están oscilando, es decir cuáles son las frecuencias que debe compensar.

Después pasan por un replay que sirve para darle un tiempo de retardo, es decir que da un rango de tiempo más amplio para que la señal salga correcta.

Para concluir se juntan las tres señales y se juntan por una salida, como se sabe la forma de onda es cuadrática y va de 0 a 1 y su función es dar un orden es decir una entran las tres fases, pero el control debe dictar que señal se prende y cuál se apaga.

La figura 11 consta de tres ecuaciones las cuales son:

$$A = u(2) * \sin(u(1)) \quad (3)$$

$$B = u(2) * \sin\left(u(1) - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

$$C = u(2) * \sin\left(u(1) + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

Donde:

$u$  = variable de entrada

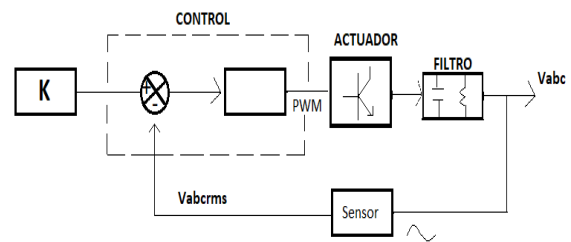


Figura 10. Diagrama de bloques del subsistema que contiene el control del filtro serie. [Autor]

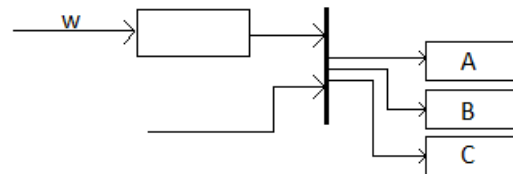


Figura 11. Diagrama de bloques del control del filtro serie. [Autor]

La figura 12 es la estructura del circuito de potencia del filtro en serie que se utilizó.

La  $g$  es por donde ingresó el control, es decir el  $V_{abc}$  inyecta la referencia e ingresa al control del filtro para esta después entrar al filtro serie añadiendo las tres señales.

El punto  $g$  se conectó a un mux y este divide las tres señales A, B y C, y como este trabaja con 0 y 1 no se puede señalar como positivo y negativo.

Se trabajó en alterna, por ende, se muestra  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  y  $s_6$ , sin embargo, el  $s_1$  y  $s_2$  se denomina como uno mismo, el  $s_1$  para la parte positiva y se añade un NOT para la parte negativa, es decir si se ingresa 1 en el  $s_1$  el  $s_2$  tendrá -1 para que se active. Entonces según el orden que se encuentre la gráfica cuadrática se activan y desactivan los IGBT's eso va a conmutar según la frecuencia, la resta de la referencia y de la señal de entrada y esa señal se inyecta en la red.

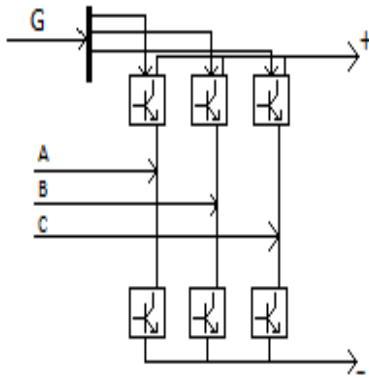


Figura 12. Esquema del circuito de potencia del filtro serie. [Autor]

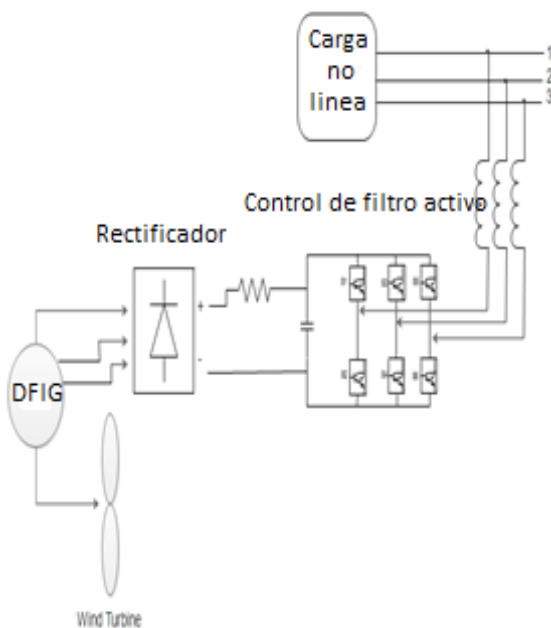


Figura 13. Filtro activo diseñado con su control y aplicado al sistema. [Autor]

El filtro es de tipo filtro activo en serie, la salida del aerogenerador de inducción de doble alimentación está conectada a un rectificador y este se conecta a una resistencia que se encuentra en paralelo conectado a un capacitor, en los terminales del capacitor se conectaría el filtro activo.

El filtro posee un conjunto de IGBT's con su respectivo control, el filtro se conecta a cada fase del sistema de manera distinta, donde  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  son lo mismo que 1, 2 y 3, estas son voltajes de la fuente.

Para esto se propuso dos casos y cada caso con dos partes: La primera parte del primer caso se implementó en la barra 740

del sistema una carga no lineal de 500W junto con el aerogenerador de inducción de doble alimentación y la segunda parte incluyendo el filtro diseñado. La primera parte del segundo caso se implementó en la barra 740 del sistema una carga no lineal de 900W junto al aerogenerador de inducción de doble alimentación y la segunda parte se incorporó el filtro en serie diseñado.

## 4 Análisis de resultados

La simulación propuesta para la correcta operación del sistema con un DFIG se desarrolló bajo dos casos. Simulando con una carga no lineal de 500W y de 900W. De igual manera el tiempo de simulación que se utilizó fue de 0,30 segundos.

El criterio que se tomó para la simulación es de dos tipos de cargas no lineales y es que el sistema es más propenso a presentar presencia de armónicos con una a comparación de la otra, por ende, su distorsión armónica total aumentará afectando así la calidad de la energía eléctrica. Estos dos casos se realizaron en la barra 740 del sistema de 37 barras IEEE.

De igual forma los resultados presentados a continuación muestran alcances más efectivos a comparación de la implementación de filtros híbridos en el mismo sistema.

En comparación con trabajos que emplean filtros híbridos se obtuvo una mejor corrección de la distorsión armónica total y por ende una notable mejora en la forma de onda de voltaje, la ventaja en relación de los filtros híbridos es que se puede realizar pasos complejos de manera más sencilla sin la necesidad de combinar filtros.

### 4.1 Análisis de resultado solo del sistema de 37 barras

Las medidas presentadas son únicamente del sistema de 37 barras IEEE tomadas del Pest Test Feeder. En la figura 19 se muestra la figura del sistema.

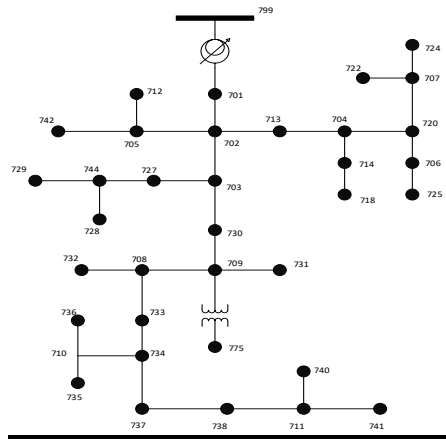


Figura 14. Esquema del sistema de prueba de 37 barras Bus Test Feeder.

La figura 15 muestra una señal pura, esto debido a que el sistema se encuentra netamente equilibrado y no cuenta con ruidos, afectaciones o mal formaciones.

Este sistema de distribución opera a 4.0kV y es un sistema equilibrado con condiciones iniciales predeterminadas.

Se procedió a realizar la simulación para sacar el análisis FFT y podemos observar en la figura 16 que no existe presencia de armónicos por lo que el porcentaje de THD es igual a 0%, esto debido a que como en un principio se mencionó el sistema tiene condiciones iniciales preestablecidas y se encuentra equilibrado.

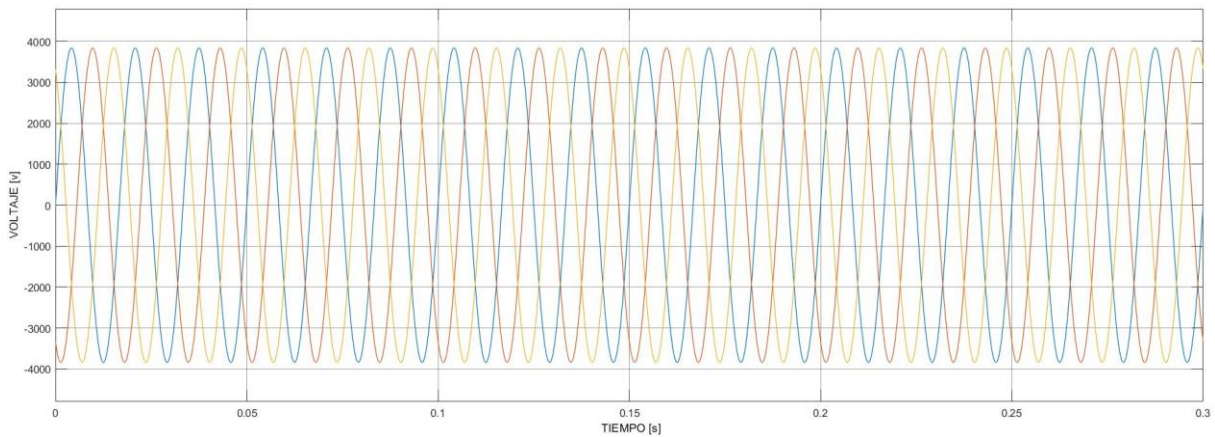


Figura 15. Señal de onda de voltaje del sistema.

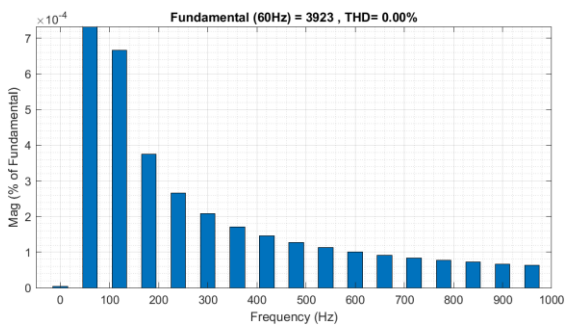


Figura 16. Análisis FFT en sistema equilibrado.

#### 4.2 Análisis en barra 740 con carga no lineal de 500W y DFIG.

Mediante la figura 17 se observa que el sistema presenta un cambio considerable con respecto a la onda de voltaje del sistema sin ningún elemento adicional. En este caso se encuentra incorporado un aerogenerador de inducción de doble alimentación y una carga no lineal de 500W, esto indica que la carga no lineal está generando picos y ruidos en la onda, lo cual genera armónicos.



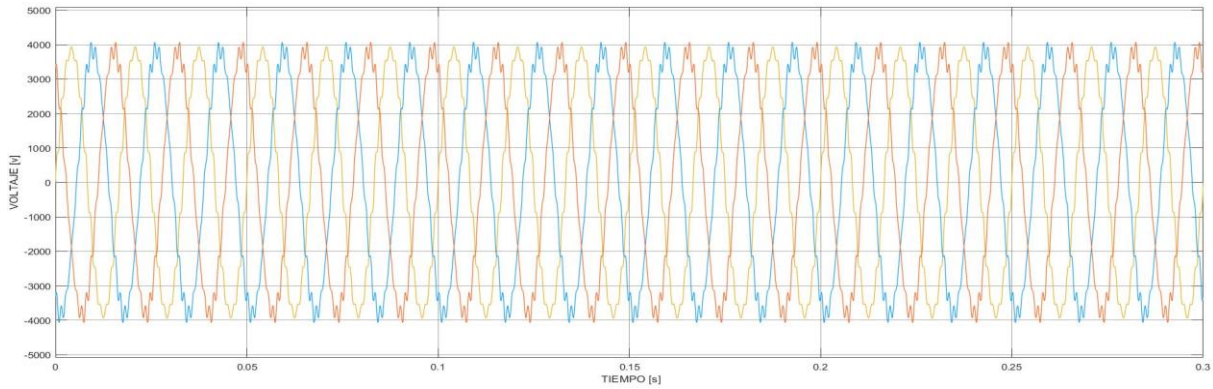


Figura 17. Onda del sistema con carga no lineal de 500W y DFIG en la barra 740.

Si la onda muestra picos y ruidos y no se acerca un poco a una onda sinusoidal pura se asume que hubo un aumento de presencia de armónicos y de igual forma el porcentaje de THD se elevara a un 14.39%, se puede observar que los armónicos que aparecen son el 5to y 7mo armónico.

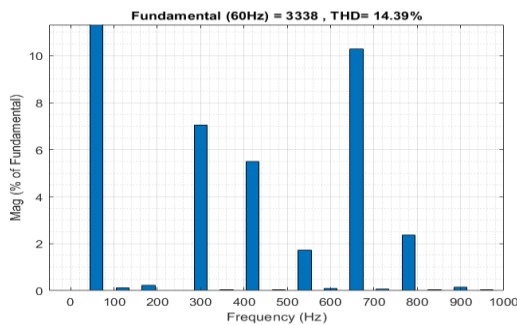


Figura 18. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 500W y DFIG.

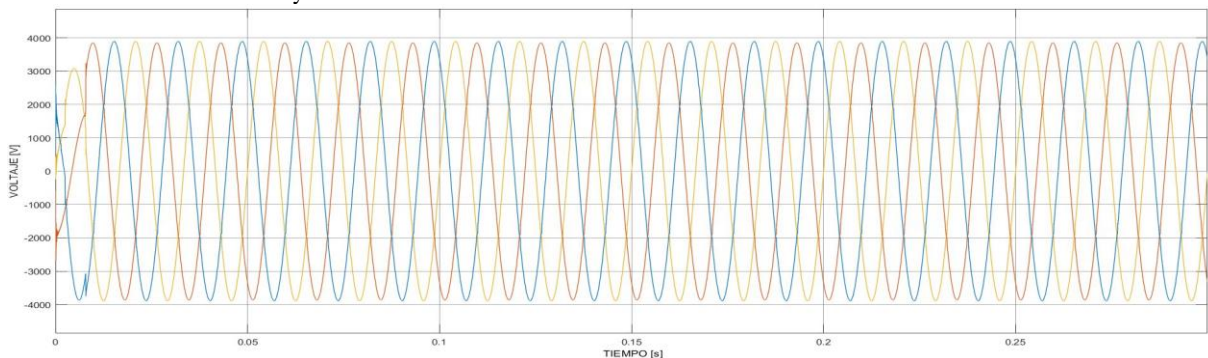


Figura 19. Onda del sistema con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro en la barra 740.

#### 4.2.1 Análisis en barra 740 con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro.

La figura 19 muestra la actuación del filtro en serie diseñado, atenuando la señal de onda de voltaje. Se observa que el filtro elimina un gran porcentaje de los armónicos existentes, sin embargo, aún podemos observar un pequeño porcentaje de armónicos y ruidos en la señal. También se puede observar que al inicio de la simulación hay una caída de voltaje que se asume que es por el encendido del aerogenerador.

La figura 20 muestra de mejor manera el pequeño porcentaje de armónicos que aún existen en la señal de onda de voltaje.

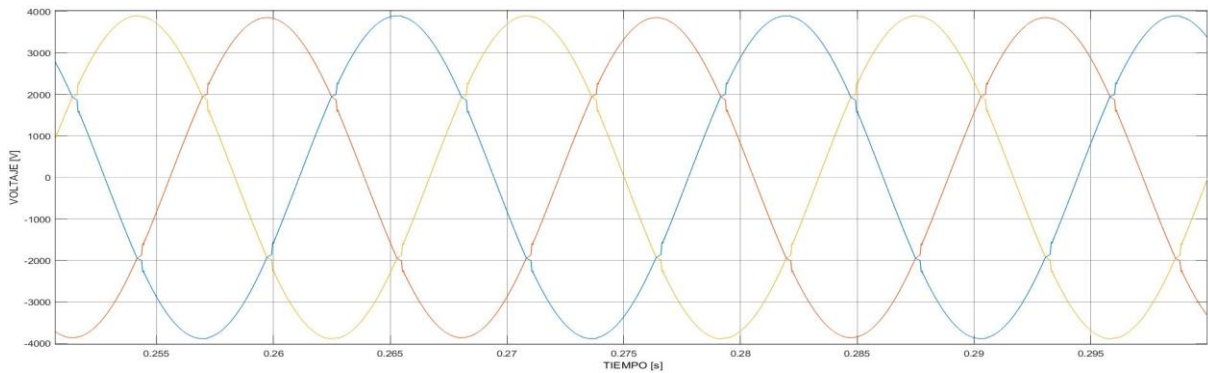


Figura 20. Corrección del filtro para la carga no lineal de 500W y DFIG en barra 740.

La figura 21 indica que la actuación del filtro se está dando de forma correcta, es decir está cumpliendo con el objetivo de este artículo, por ende, se observa que el porcentaje de THD disminuye a comparación de los armónicos generados por la carga no lineal de 500W y se tiene 3.29% al final.

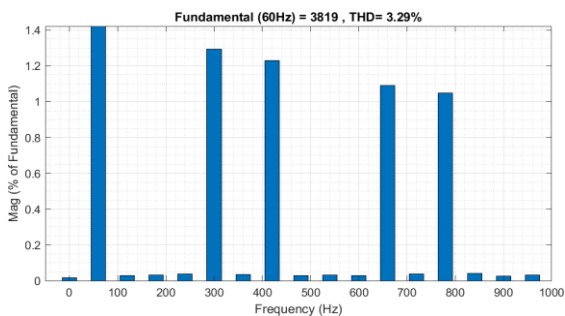


Figura 21. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 500W, DFIG y filtro.

#### 4.2.2 Análisis en barra 740 con carga no lineal de 900W y DFIG.

La figura 22 fue simulada con el aerogenerador de inducción de doble alimentación y con una carga no lineal de 900W en la barra 740 y se observa que la gráfica tiene mayor número de picos generados por la presencia de armónicos.

Mientras que la figura 23 indica el porcentaje total de THD lo cual se puede observar un mayor porcentaje a comparación del anterior caso de estudio y es causado por la carga no lineal de 900W.

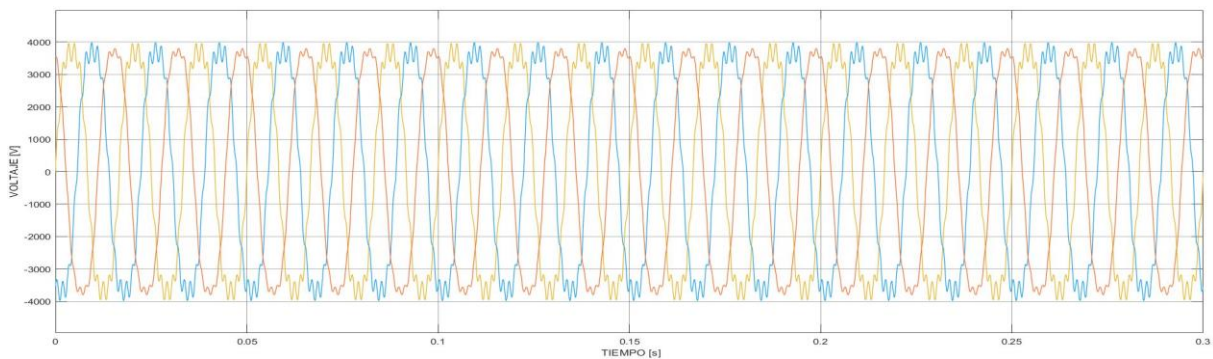


Figura 22. Onda del sistema con carga no lineal de 900W y DFIG en la barra 740.

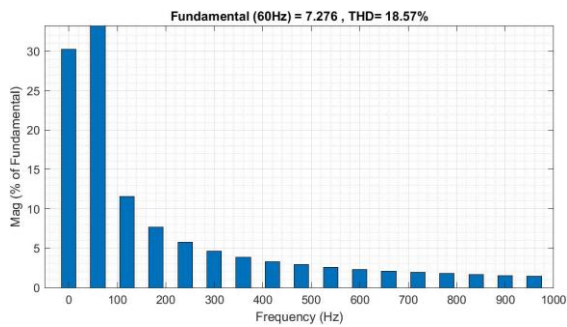


Figura 23. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 900W y DFIG.

#### 4.2.3 Análisis en barra 740 con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro.

La figura 24 muestra la corrección de la onda, demostrando al inicio que existe una caída de voltaje, lo que nuevamente se argumenta que es por la implementación de un aerogenerador de inducción de doble alimentación. Al concluir esta falla transitoria la onda se atenúa y empieza a

oscilar de forma correcta, sin embargo, a comparación de la anterior gráfica con carga no lineal de 500W en esta se puede observar que existe una mayor presencia de ruido y armónicos lo cual se asocia al aumento del valor de la carga no lineal que es de 900W.

La figura 25 muestra de mejor manera los picos y ruidos que aún existen en la onda y la diferencia que existe en la corrección con el filtro de la onda con carga no lineal de 500W. Esto se justifica por el valor, ya que al presentar una carga no lineal mayor existirá mayor presencia de picos y ruido.

La figura 26 muestra su porcentaje de THD de 4.57%. Esto quiere decir que el filtro diseñado trabajó de forma correcta y que actuó en las señales de voltaje de manera eficiente, además de como resultado se puede comparar que el filtro actuó de mejor manera al tener una carga no lineal menor.

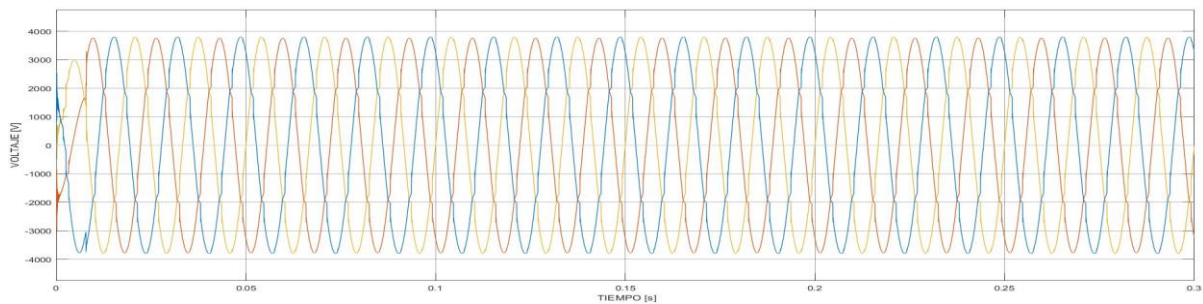


Figura 24. Onda del sistema con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro en la barra 740.

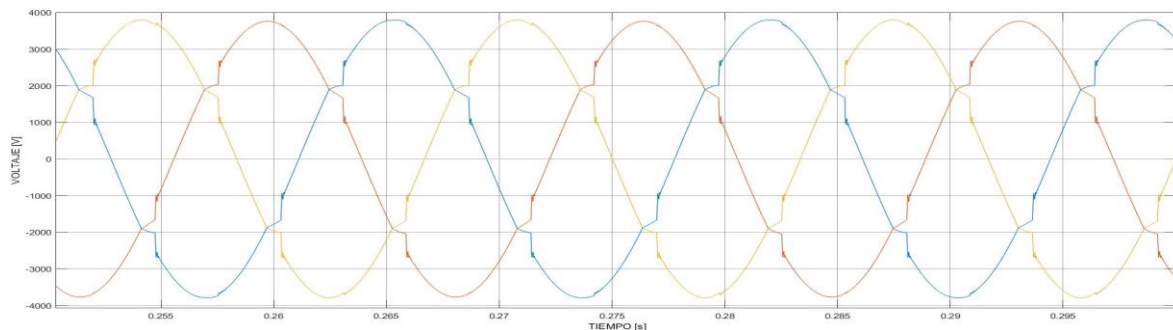


Figura 25. Corrección del filtro para la carga no lineal de 900W y DFIG en la barra 740.



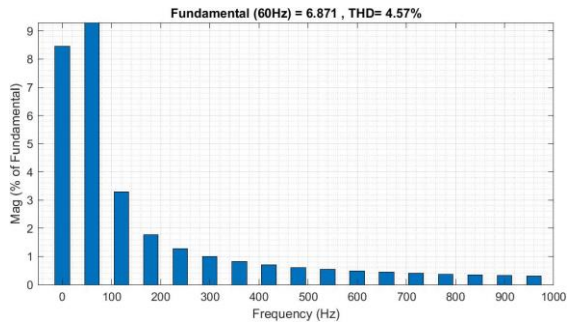


Figura 26. Análisis FFT en barra 740 con carga no lineal de 900W, DFIG y filtro.

Para finalizar, para argumentar el funcionamiento del filtro en serie, este se encuentra inicialmente cerrado, lo cual se puede observar en todas las gráficas que existe una falla transitoria y es una caída de voltaje generado por el DFIG al inicio de la simulación, sin embargo, el filtro actúa y corrige la señal de onda a su voltaje nominal que es de 4.0kV y suprime los picos y ruidos.

## 5 Conclusiones

Finalizado el diseño, la simulación y el análisis del sistema de los 2 casos se llegó a las siguientes conclusiones:

La primera prueba, el modelado planteó una simulación del sistema equilibrado sin ningún elemento extra, obteniendo una red perfectamente equilibrada, una onda senoidal pura, un voltaje de entrada predeterminado de 4.0kV y a su salida el mismo voltaje y una distorsión armónica total del 0%.

En la primera parte del primer caso se propuso la conexión de un aerogenerador de inducción de doble alimentación y una carga no lineal de 500W en la barra 740 del sistema, dando como resultado una presencia considerable de armónicos, lo cual afecta la señal de onda de voltaje, causando ruidos y picos en la onda y con una distorsión armónica total de 14.39%.

En la segunda parte del primer caso ya se añadió el filtro en serie diseñado a la salida del aerogenerador, por lo cual se obtuvo que la onda a un principio de la simulación

presenta una caída de voltaje con lo que se argumenta es por el encendido del DFIG, sin embargo, el filtro actúa y corrige de forma eficiente la onda de voltaje atenuándola al voltaje inicial de 4.0kV y suprimiendo gran parte de los picos y ruidos que se presentaron al incorporar la carga no lineal de 500W. De igual manera el análisis de THD nos muestra la correcta corrección del filtro obteniendo un porcentaje de 3.29%.

En la primera parte del segundo caso se propuso la conexión del DFIG y una carga no lineal, en esta ocasión de 900W en la barra 740 del sistema y como resultado se obtuvo una mayor presencia de armónicos causando mayor número de picos y ruidos a comparación de la primera parte del primer caso. Su THD aumenta a 18.57% por el aumento del valor de la carga no lineal.

En la segunda parte del segundo caso se añadió el filtro en serie diseñado a la salida del aerogenerador, por lo cual se obtuvo que la onda inicialmente presenta una caída de voltaje al igual que el anterior caso. El filtro atenúa la onda corrigiéndola al voltaje predeterminado del sistema 4.0kV y elimina los picos y ruidos existentes provocados por los armónicos. A comparación del primer caso el filtro suprime los armónicos en gran parte, sin embargo, la señal de onda de voltaje muestra una pequeña presencia de picos y ruidos, esto debido a que el valor de la carga no lineal es mayor en el segundo caso es decir 900W y su porcentaje de THD es de 4.57%.

Con el trabajo se concluyó que el diseño de filtros desde cero si tiene un impacto positivo en los sistemas, por ende, la calidad de energía será óptima para su respectiva distribución a sectores, industriales, comerciales y residenciales.

De igual manera se concluye que el filtro activo en serie diseñado e implementado es mucho más fácil de manejarlo y tiene ventajas más eficaces a comparación de los filtros híbridos. Incluso sus resultados son parcialmente más positivos que la

implementación de filtros híbridos. El filtro diseñado que se presentó cumple de mejor manera la corrección de la distorsión armónica total con un 2.5% de diferencia.

### 5.1 Trabajos futuros

Los resultados que surgieron en el presente artículo plantean seguir apoyando trabajos que implementen máquinas con cargas no lineales en el sistema de distribución.

Diseñar nuevos filtros destinados a las señales de onda tanto de voltaje como de corriente para así tener un sistema de distribución sin afectaciones.

Se recomienda, tener en cuenta las versiones del software a utilizarse y que sean compatibles con las diferentes bibliotecas.

## 6 Referencias

- [1] A. Subhana and Nahid-Al-Masood, "Estimation of Frequency Stability Considering Load Levels and Load Frequency Relief," in *Proceedings of 2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering, WIECON-ECE 2020*, Dec. 2020, pp. 448–451. doi: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397973.
- [2] A. Aziz, A. T. Oo, and A. Stojcevski, "Analysis of frequency sensitive wind plant penetration effect on load frequency control of hybrid power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, no. November 2017, pp. 603–617, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.045.
- [3] A. V. P. Kumar, A. M. Parimi, and K. U. Rao, "A comparative analysis of Load Frequency Control Strategy of a Voltage Source Inverter for a stand-alone PV-Wind hybrid system," *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016*, 2016, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584130.
- [4] L. Zhou, Q. Feng, Z. Long, and Y. Li, "Ultra-wide stopband HTS LPF with closed-loop cross-coupled microstrip structure," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 135, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.aeue.2021.153736.
- [5] W. H. Gunawan, F. Oktafiani, B. Sugeng, and L. Lukman, "Low Pass Filter Design With Artificial Ground Structure," *JST (Jurnal Sains Terapan)*, vol. 3, no. 2, Oct. 2017, doi: 10.32487/jst.v3i2.266.
- [6] G. Suriya Priya and M. Geethanjali, "Design and Development of Distance Protection Scheme for Wind Power Distributed Generation," *2018 National Power Engineering Conference, NPEC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/NPEC.2018.8476720.
- [7] W. Vásquez and J. Játiva, "Modelación, Simulación y Control de Aerogeneradores con Generador de Inducción Doblemente Alimentado Utilizando Matlab". *Revista Técnica "energía"*, no. 11, pp. 143–152, 2015.
- [8] A. Shahid, "Performance evaluation of sinusoidal and Space Vector Pulse-Width-Modulation for power quality enhancement in distributed generation systems," *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2015*, vol. 00, no. c, 2015, doi: 10.1109/PEDG.2015.7223066.
- [9] G. Chen, F. L. Lewis, E. N. Feng, and Y. Song, "Distributed Optimal Active Power Control of Multiple Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp.

- 7079–7090, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2431631.
- [10] J. Manuel, G. Alvarez, J. Carlos, and G. Targarona, “GENERACIÓN EÓLICA EMPLEANDO DISTINTOS TIPOS DE GENERADORES CONSIDERANDO SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE POTENCIA WIND GENERATION USING DIFFERENT GENERATORS CONSIDERING THEIR IMPACT ON POWER SYSTEM,” vol. 78, pp. 95–104, 2011.
- [11] S. Roga, S. Bardhan, Y. Kumar, and S. K. Dubey, “Recent technology and challenges of wind energy generation: A review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102239, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102239.
- [12] S. Xuewei *et al.*, “Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility; Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility,” *2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2020, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349645/20/\$31.00.
- [13] Z. Yuan *et al.*, “Capacity planning of wind generation units in multi-wind-generation DC-connected system based on cooperative game,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1601–1609, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.062.
- [14] V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, and P. L. Arnera, “Filtro Activo adaptado a diferentes configuraciones operativas de una planta industrial,” in *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2014*, 2014, pp. 263–268. doi: 10.1109/ARGENCON.2014.6868505.
- [15] M. V. M. Rodrigues, H. K. Morales-Paredes, F. L. Paes, M. B. Arcadepani, F. A. Serrão Gonçalves, and F. P. Marafão, “Aprimoramento da Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Monofásicas,” in *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021 - Proceedings*, Aug. 2021, pp. 375–379. doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529441.
- [16] Z. Guo, Z. Pu, W. Du, H. Wang, and C. Li, “Improved adversarial learning for fault feature generation of wind turbine gearbox,” *Renewable Energy*, vol. 185, pp. 255–266, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.054.
- [17] D. M. Schneider, M. O. Oliveira, O. E. Perrone, J. J. Ledesma, and O. H. A. Junior, “Development of power filter type ‘C’ for the control of power quality parameters,” in *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2016*, Oct. 2016, pp. 2–8. doi: 10.1109/ARGENCON.2016.7585301.
- [18] Q. Li *et al.*, “Prediction of power generation of two 30 kW Horizontal Axis Wind Turbines with Gaussian model,” *Energy*, vol. 231, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121075.
- [19] Z. J. Lin, H. Chen, and X. Yin, “Discussion on ‘data-Driven Stochastic Unit Commitment for Integrating Wind Generation,’” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, p. 3983, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2932510.
- [20] H. Parastvand, A. Modirrousta, M. J. Khosrowjerdi, and V. Cheraghi, “Robust PID synthesis for load frequency control,” in *22nd Iranian*

- Conference on Electrical Engineering, ICEE 2014*, Dec. 2014, pp. 1284–1289. doi: 10.1109/IranianCEE.2014.6999732.
- [21] M. M. Ozyetkin, “An approximation method and PID controller tuning for systems having integer order and non-integer order delay,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 12, pp. 11365–11375, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.05.015.
- [22] Y. Liao, Z. Liu, H. Zhang, and B. Wen, “Low-Frequency Stability Analysis of Single-Phase System with dq-Frame Impedance Approach - Part II: Stability and Frequency Analysis,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5012–5024, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2828386.
- [23] M. Marzband, M. M. Moghaddam, M. F. Akorede, and G. Khomeyrani, “Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids,” *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 78–86, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.06.037.
- [24] B. Vedik, R. Kumar, R. Deshmukh, S. Verma, and C. K. Shiva, “Renewable Energy-Based Load Frequency Stabilization of Interconnected Power Systems Using Quasi-Oppositional Dragonfly Algorithm,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 227–243, 2021, doi: 10.1007/s40313-020-00643-3.
- [25] A. G. de Freitas, R. B. dos Santos, L. M. Pereira, Y. O. Lima, and L. A. M. Riascos, “Parametrização de um novo alimentador de sólidos em função da eficiência energética,” in *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021 - Proceedings*, Aug. 2021, pp. 469–474. doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529775.
- [26] C. v. Luis Alejandro, R. P. Cristian, and R. G. Oscar, “Mejora de la Eficiencia en la Transferencia Inalámbrica de Energía del Enlace Inductivo de 3 Bobinas de Tipo SCMR,” Dec. 2020. doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505418.
- [27] M. V. M. Rodrigues, H. K. Morales-Paredes, F. L. Paes, M. B. Arcadepani, F. A. Serrão Gonçalves, and F. P. Marafão, “Aprimoramento da Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Monofásicas,” in *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021 - Proceedings*, Aug. 2021, pp. 375–379. doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529441.
- [28] I. Carugati, M. A. Funes, P. G. Donato, J. L. Strack, C. M. Orallo, and M. Hadad, “Calidad de Energía en Ciudades Inteligentes: primeros resultados en la ciudad de Mar del Plata,” Dec. 2020. doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505326.
- [29] A. do A. Martins, A. C. Delaiba, D. Bispo, G. Ranulfo, and S. F. P. Silva, “Procedimentos de análise de eficiência energética em sistemas de ar comprimido industriais,” 2010. doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5739926.
- [30] G. Monte, D. Marasco, R. Bufanio, A. Agnello, N. Scarone, and P. Liscovsky, “Algoritmos de Detección y Clasificación de Eventos de Calidad de Energía en el Dominio Temporal,” Dec. 2020. doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505434.

## 6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 1: Matriz de estado del arte.

<b>DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA CONTROL DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DE UN AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN DE DOBLE ALIMENTACIÓN.</b>																				
ITEM	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA	
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistema de distribución	Tipo de filtros	Aerogenerador DFIG	Origen de armónicos	Distorsión armónica	Calidad de energía	Reducción de pérdidas en la red	Estabilidad del sistema	Control de armónicos	Reducción de pérdidas en los sectores eléctricos	Ondas de voltaje	THD	Voltaje del sistema	Sistema equilibrado de 37 barras	Simulaciones con distintos escenarios, sistema con implementación de diferentes elementos.	Diseño de filtro activo de potencia e implementación en el sistema	Compensación de voltajes armónicos.
1	2013	Electric system	46	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2011	Electrical machines of great generation and impact on the network	145	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2019	MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF WIND TURBINES WITH DOUBLE-FED INDUCTION GENERATOR USING MATLAB	21	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2020	Harmonic filtering using a hybrid filter and frequency matching	56	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	2014	"HARMONICS: CAUSES, EFFECTS AND MINIMIZATION."	178	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2010	Renewable energy and energetic efficiency	52	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2006	"Modelling, Simulation and Control of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator Using Matlab	125	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8	2019	Electric power distribution systems	25	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	
9	2015	“WIND GENERATION USING DIFFERENT TYPES OF GENERATORS CONSIDERING THEIR IMPACT ON THE POWER SYSTEM WIND GENERATION USING DIFFERENT GENERATORS CONSIDERING THEIR IMPACT ON POWER SYSTEM.”	235	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
10	2017	Power system analysis	45	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐
11	2020	DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ACTIVE FILTER FOR THE ELIMINATION OF HARMONICS FROM A RESIDENTIAL TWO-PHASE NETWORK	56	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
12	2016	“Active Filter adapted to different operating configurations of an industrial plant	85	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐
13	2018	Improvement of the Quality of Electric Power in Single-Phase Installations,	124	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
14	2021	“Active Power Filters.”	25	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
15	2021	“Development of power filter type ‘C’ for the control of power quality parameters.”	123	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
16	2020	INDUSTRIAL AND TELECOMMUNICATIONS	234	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐
17	2019	“Analysis of TIME SERIES	45	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◆	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
18	2018	IMPLEMENTATION OF AN ADAPTIVE CONTROLLER FOR ACTIVE POWER FILTERS	78	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	◆	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
19	2019	National University of La Plata Faculty of Engineering Motor Project Note of chair-Parameters of Similarity in MCLA	95	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

20	2021	Implementation of real-time digital filter for the R wave detection	75	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	2020	Parameterization of a new solids feeder in function of energy efficiency," in 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON	89	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2020	Improving the Efficiency in the Wireless Energy Transfer of the Inductive Link of 3 Type SCMR Coils	563	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2021	Improvement of the Quality of Electric Power in Single-Phase Installations	125	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	2019	Energy Quality in Smart Cities: first results in the city of Mar del Plata	42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	2019	Energy efficiency analysis procedures in industrial compressed air systems	135	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	2018	Algorithms for the Detection and Classification of Power Quality Events in the Time Domain	145	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	2017	Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG).	155	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	2021	Dynamic Stability Impact of the Hybrid Wind and Microhydro Renewable Energy Sources on the Distribution System.	168	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	2020	"Estimation of Frequency Stability Considering Load Levels and Load Frequency Relief."	187	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	2019	"Prediction of power generation of two 30 kW Horizontal Axis Wind Turbines with Gaussian model	371	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>CANTIDAD:</b>				8	11	8	9	9	8	13	8	5	8	8	9	11	6	6	12	2

## 6.2 Resumen de Indicadores

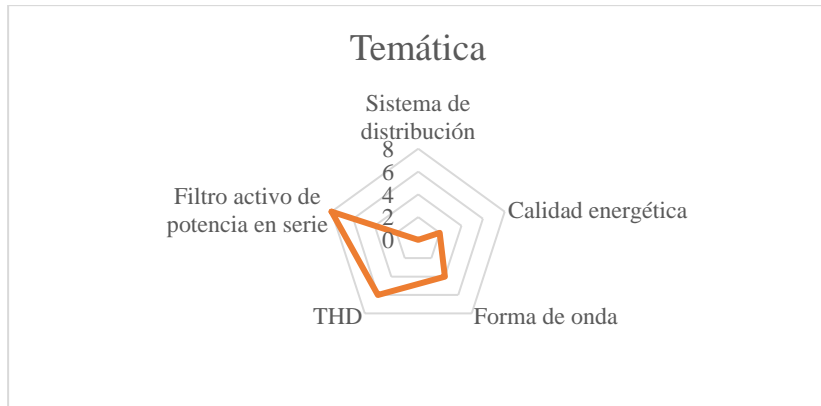


Figura 27. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

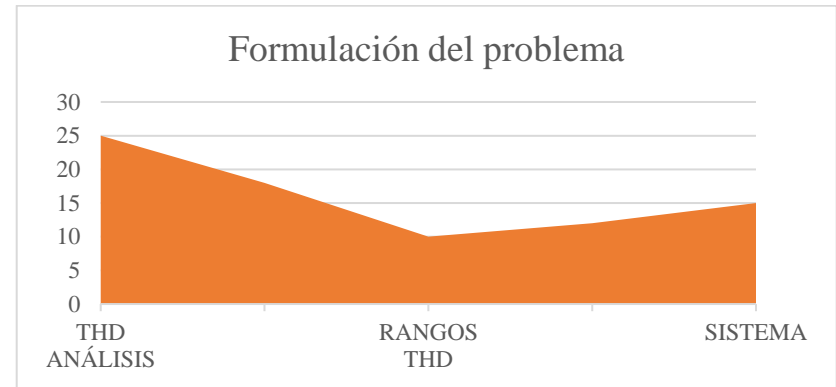


Figura 28. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

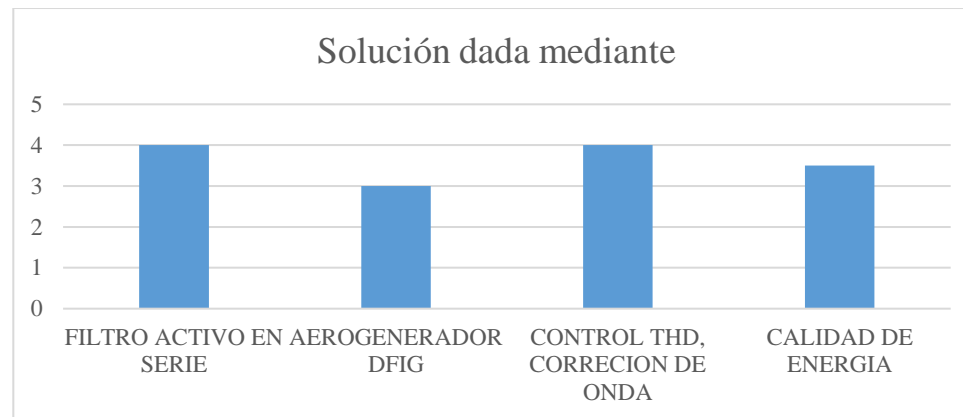


Figura 29. Indicador de solución - Estado del arte.



## 7 Anexos

Tabla 2: Parámetros para implementación de un SEP

<b>Orden jerárquico</b>	<b>Parámetro</b>
Paso 1	Planificación
Paso 2	Diseño
Paso 3	Construcción
Paso 4	Operación

Tabla 3: Nivel de armónicos impares según la norma IEEE 50160

<b>Armónicos impares Orden h</b>	<b>Según norma 50160</b>
3 armónico	5%
5 armónico	6%
7 armónico	5%
9 armónico	1.5%
11 armónico	3.5%
13 armónico	3%
15 armónico	0.5%
17 armónico	2%
19 armónico	1.5%
21 armónico	0.5%
23 armónico	1.5%
25 armónico	1.5%

Tabla 4: Nivel de armónicos pares según la norma IEEE 50160

<b>Armónicos pares Orden h</b>	<b>Según norma 50160</b>
2 armónico	2%
4 armónico	1%
6 armónico	0.5%
24 armónico	0.5%

Tabla 5: Nivel máximo de THD según la norma IEEE 50160

<b>Parámetro</b>	<b>Según norma 50160</b>
%THD	8%

Tabla 6: Nivel de armónicos según norma IEEE 519

<b>Parámetro</b>	<b>Según norma IEEE 519</b>
3er armónico	5%
5to armónico	5%
7mo armónico	5%
9no armónico	5%
11vo armónico	5%
% THD	8%

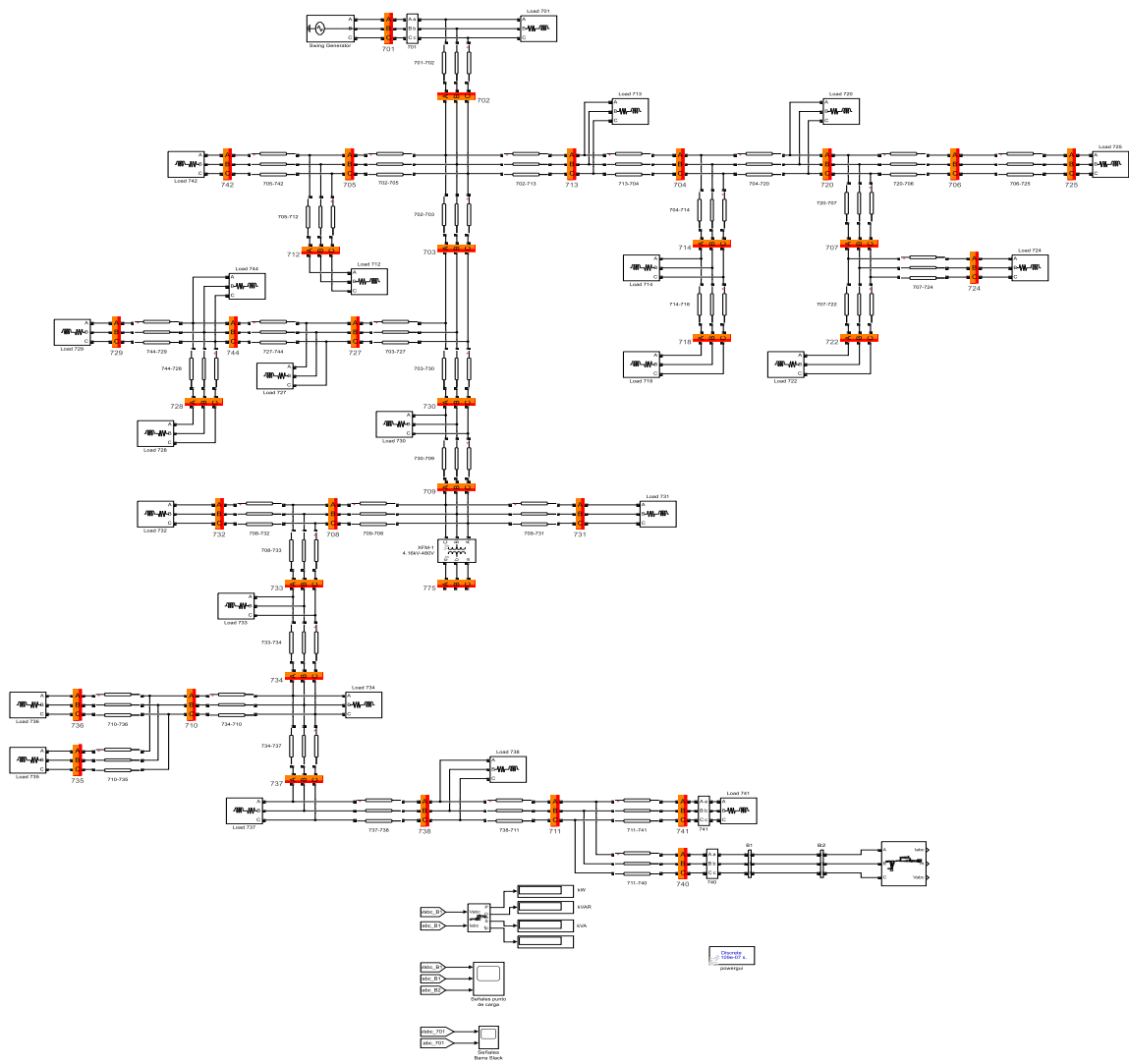


Figura 30. Sistema de 37 barras IEEE con DFIG, carga no lineal y filtro en barra 740 del sistema.