

**MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS
DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

**AUTOR:
CRISTIAN MAURICIO AYALA CRIOLLO**

**DIRECTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito, julio 2017

Cristian Mauricio Ayala Criollo

**MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ARMÓNICOS
EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Dirigido por:

Cristian Mauricio Ayala Criollo (Y'1984-M'08). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Técnico Superior Otavalo, se graduó de Físico Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en modelación de Armónicos en Sistemas de Transmisión Eléctrica.

cayalac@est.ups.edu.ec



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).

dcarrion@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
©2017 Universidad Politécnica
Salesiana
QUITO-ECUADOR

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y la salud, para poder culminar una meta más en mi vida en especial a todos mis docentes quienes con cada granito de su valioso conocimiento me supieron guiar y formar como profesional y persona a la vez en este arduo caminar, no solo con los conocimientos impartidos en las aulas, sino también por los conocimientos impartidos sobre la vida y el diario vivir... a mi tutor Ing. Diego Carrión que me supo escuchar y aconsejar en los momentos más duros de mi vida y a todos mis colegas y amigos que con su apoyo me dieron ánimos a seguir luchando por un ideal alcanzado.

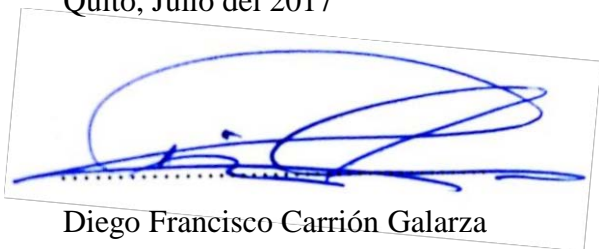
DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres que desde que fui niño estuvieron apoyándome para culminar todos mis estudios, a Verónica que fue mi fuente de inspiración y soporte fundamental en esta etapa, sin importar si estás o no ya en mi vida pero siempre en mis pensamientos, a mi hija Kamilah que con sus ocurrencias ha llenado mi vida de amor y de deseos de vivir, superarme y luchar constantemente, a todos mis familiares que me supieron darme su cariño apoyo y amor incondicional en todos los momentos de mi existencia, a mis amigos que compartieron muchos momentos y consejos gratos con mi persona, GRACIAS DE TODO CORAZÓN A TODOS Y UN DIOS LES PAGUE

Declaratoria de coautoría del docente tutor/a

Yo, DIEGO FRANCISCO CARRION GALARZA declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA*” realizado por Cristian Mauricio Ayala Criollo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio del 2017



Diego Francisco Carrión Galarza

Cédula de identidad: 171370306-2

Cesión de derechos de autor

Yo, Cristian Mauricio Ayala Criollo, con documento de identificación N° 1717730285, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Modelación de la Propagación de Armónicos en Redes de Transmisión”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Cristian Mauricio Ayala C
Cédula: 171773028-5

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN	2
ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	3
2.1 Armónicos y sus generalidades.....	3
2.2 Secuencia de armónicos en función de su amplitud	3
2.3 Análisis de las señales armónicas	3
2.3.1 Transformada de Fourier.....	4
2.3.2 Transformada Discreta de Fourier	4
2.3.3 Transformada rápida de Fourier.....	4
2.4 Evaluación de índices de armónicos	5
2.4.1 Cálculo de la Distorsión de Armónica Total.....	5
2.4.2 Distorsión Total de la Demanda,.....	5
2.4.3 Límites de distorsión de corriente	5
2.4.4 Límites de distorsión de Voltaje	6
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
3.1 Modelo de elementos no-lineales a considerar	6
3.1.1 Generador sincrónico	6
3.1.2 Transformador.....	6
3.1.3 Línea larga de transmisión	7
ANÁLISIS DE RESULTADOS	10
4.1 Datos generales de elementos considerados	10
4.2 Caso 1, Línea con carga y 1 iteración	10
4.2.1 Solo señal fundamental	10

4.2.2 La señal fundamental más los dos primeros armónicos, con una sola iteración.....	11
4.2.3 La señal fundamental más los cuatro primeros armónicos, con una sola iteración	11
4.2.4 La señal fundamental más los seis primeros armónicos, con una sola iteración	12
4.2.5 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con una sola iteración	13
4.3 Caso 2, Línea con carga y 10 iteraciones.....	13
4.3.1 La señal fundamental más los dos primeros armónicos, con diez iteraciones.	13
4.3.2 La señal fundamental más los cuatro primeros armónicos, con diez iteraciones.	14
4.3.3 La señal fundamental más los seis primeros armónicos, con diez iteraciones.	15
4.3.4 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con diez iteraciones.....	16
4.3 Caso 3, Línea con carga y 30 iteraciones.....	16
4.3.1 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con treinta iteraciones.	16
5. CONCLUSIONES	17
6. REFERENCIAS.....	18
6.1 Estado del Arte.....	20

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Generador sincrónico a frecuencia fundamental, (b) generador sincrónico a frecuencia de armónicos.	6
Figura 2. Diagrama general del un transformador.	6
Figura 3. Diagrama π de un transformador.....	7
Figura 4. Diagrama π para una línea larga en transmisión.	7
Figura 5. Diagrama de conexión simple de una línea de transmisión larga.....	8
Figura 6. Gráfico de cuadripolos en líneas de transmisión	8
Figura 7. Señal fundamental de voltaje al ingreso y salida de la línea PI.....	10
Figura 8. Señal fundamental de corriente al ingreso y salida de la línea PI	10
Figura 9. Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	11
Figura 10. Periodograma de la señal total	11
Figura 11. Periodograma de la señal en los 2h y 3h.....	11
Figura 12. Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	11
Figura 13. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h y 5h.....	12
Figura 14. Señal de voltaje con superposición de 6 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	12
Figura 15. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h y 7h.....	12

Figura 16.	Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	13
Figura 17.	Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.....	13
Figura 18.	Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	13
Figura 19.	Periodograma de la señal total	13
Figura 20.	Periodograma de la señal en los 2h y 3h.....	14
Figura 21.	Señal de voltaje con superposición de 4 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	14
Figura 22.	Periodograma de la señal en los 1h 2h, 3h, 4h y 5h.....	14
Figura 23.	Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h y 5h.....	14
Figura 24.	Señal de voltaje con superposición de 6 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	15
Figura 25.	Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h y 7h.....	15
Figura 26.	Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	16
Figura 27.	Periodograma de la señal en los 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.....	16
Figura 28.	Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.....	16
Figura 29.	Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y treinta iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI.....	16
Figura 30.	Periodograma de la señal total 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.....	17
Figura 31.	Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.....	17
Figura 32.	Indicadores de estado del arte, TEMÁTICA	23
Figura 33.	Indicadores de estado del arte, FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
Figura 34.	Indicadores de estado del arte, SOLUCIÓN DADA	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Secuencia de armónicos.....	3
Tabla 2.	Máxima distorsión de corriente en porcentaje de $\diamond L$ [7].....	5
Tabla 3.	Límites de distorsión de Voltaje [6],[7].....	6
Tabla 4.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea	10
Tabla 5.	Caídas de tensión y corriente en la línea	10
Tabla 6.	THD y TDD de la señal fundamental	10
Tabla 7.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 3h.....	11
Tabla 8.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 3h	11
Tabla 9.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 3h.....	11
Tabla 10.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 5h	12
Tabla 11.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 5h.....	12
Tabla 12.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 5h	12
Tabla 13.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 7h	12
Tabla 14.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 7h.....	12

Tabla 15.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 7h	12
Tabla 16.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h	13
Tabla 17.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h.....	13
Tabla 18.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h	13
Tabla 19.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 3h.	14
Tabla 20.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 3h.....	14
Tabla 21.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 3h	14
Tabla 22.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 5h	15
Tabla 23.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 5h.....	15
Tabla 24.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 5h	15
Tabla 25.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 7h	15
Tabla 26.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 7h.....	15
Tabla 27.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 7h	15
Tabla 28.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h	16
Tabla 29.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h.....	16
Tabla 30.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h	16
Tabla 31.	Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h.	17
Tabla 32.	Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h.....	17
Tabla 33.	THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h	17
Tabla 34.	Matriz de estado del arte	20

MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Resumen

En este documento se presenta la modelación de la propagación de armónicos en redes de transmisión eléctrica, para definir la afectación de las ondas de voltajes y de corrientes; en resultado, comprobar la calidad de energía. Para efectos del estudio se realiza el análisis de señales provenientes de fuentes no lineales e introducidas en los sistemas eléctricos de potencia mediante el empleo de los métodos no paramétricos, que implican el análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de Tiempo-Frecuencia. Para el modelado de las líneas de transmisión se lo efectuó mediante el modelo π de parámetros distribuidos en líneas largas. Para la modelación y simulación se considera el teorema de superposición de armónicos y el factor de coincidencia de señales no lineales en un nodo en común. Finalmente, se muestran los porcentajes de armónicos que inciden en las líneas largas en relación a la cantidad de señales no lineales inyectadas al nodo para determinar la calidad de onda de voltaje y de corriente.

Palabras Clave: Armónicos, Distorsión Total de la Demanda (TDD), Distorsión Armónica Total (DHT), Líneas de transmisión, Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Abstract

This paper presents the modeling of the harmonics propagation in the electrical transmission lines, to define the effect of voltage and current signals; and consequently, determine your energy quality. For the purposes of the study, the analysis of the signals from the nonlinear sources is carried out and it is introduced in the electrical power systems by the use of non-parametric methods, which involves time domain analysis and Time domain - Frequency. For the model of the transmission lines is done by the π model of the parameters distributed in long lines. For modeling and simulation, the overlap of harmonics and the coincidence factor of nonlinear signals in a common node were considered. Finally, the harmonic percentages that affect the long lines are shown in relation to the number of signals no line injected to the node to determine the voltage and current waveform.

Keywords: Harmonics, Total Demand Distortion (TDD), Total Harmonic Distortion (THD), Transmission Lines, Fast Fourier Transform (FFT).

1. Introducción

Actualmente, el desarrollo tecnológico y científico se ha ido profundizando en conocer cómo afectan los armónicos en las etapas y elementos de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), como son: generación, transmisión, subtransmisión, distribución de energía eléctrica hasta llegar al consumidor final, donde presentan disímiles resultados que pueden resultar perjudiciales para la estabilidad del SEP en el caso que uno de estos falle [1]–[3],[4]. Tales estudios, explican cómo las cargas no lineales más representativas o fuentes de generación no lineales pueden influir en la forma de onda fundamental bajo un índice de coincidencia en el que se llegue a afectar a un nodo en común, y alterar su comportamiento [5], presentándose fenómenos como: el efecto piel, el efecto corona, corriente Eddy, ferro resonancia, caída de tensión armónica, cruce por cero entre otras, causando daños en los elementos del SEP. Tales fenómenos, se resumen en un problema general, y que es la presencia de Armónicos inyectados en la señal fundamental, la misma que afecta a la calidad de energía al final de la transmisión [6].

La mayoría de las investigaciones han sido en torno a los sistemas de Distribución, debido a que es el área donde más ha afectado a la señal por el incremento de cargas no lineales, así como fuentes no lineales, que están constituidos por elementos de Electrónica de Potencia. Estas señales, en la mayor parte son múltiplos enteros de la frecuencia llamadas armónicos; y cuando no son múltiplos enteros a la fundamental se los conoce como sub-armónicos; y si son valores menores a la fundamental se los conoce como Interarmónicos. Sin embargo, estudios de armónicos en la etapa de Transmisión han sido escasos, lo que motiva a la presente investigación enfocándose únicamente en la presencia de Armónicos y su perjuicio en la calidad de energía [1], [2], [7]–[9].

En la etapa de Transmisión a las líneas se modeló como un sistema lineal de propagación de armónicos independientes y de muy bajos valores y que simplifican los cálculos y la

forma de onda puede ser representada por series trigonométricas [10]. El estudio de armónicos parte de dos métodos: el método no Paramétrico, este a su vez se subdivide en el análisis del dominio del Tiempo, y en el análisis del dominio de Tiempo-Frecuencia; y el método Paramétrico, que se basa exclusivamente en dos modelos: el Sinusoidal y Estocástico [3].

Estas dos técnicas expuestas contemplan una gran variedad de soluciones, pero en el presente estudio está enfocado al uso del Método No Paramétrico que contempla [4]: la Transformada Discreta de Fourier (DFT) [11]–[14] utilizado para el filtrado de la señal [12], la misma que puede ser resuelta por la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [13] para eliminar cálculos repetitivos y minimizar el tiempo de procesamiento de información y el contenido de armónicos pueden variar en el tiempo debido a los cambios continuos en la configuración del sistema bajo carga [15], para descomponer la señal de una forma más detallada en múltiples señales de tiempo y frecuencia se utiliza la Transformada de Wavelet (WT) [16], [17], Transformada de Hilbert-Huang (HHT) [18], [19], Transformada z [20], las cuales no utilizadas, más bien está centrada en el uso de DFT y FFT para el análisis de armónicos.

En esta investigación se eligió la modelación de una línea larga mediante el modelo PI, por que contempla mayor exactitud en la representación de fenómenos de resistencia, capacitancia e inductancia, cuyo análisis se lo realiza mediante parámetros distribuidos en todo el trayecto de la línea, en el cual se calcula los valores de los cuadripolos de voltajes y corrientes, tanto emisor como receptor [21].

Para el análisis de voltajes y corrientes en el transformador se tomó como referencia el modelo de circuito equivalente PI para el transformador, y para el análisis de las cargas se toma el modelo equivalente de una carga [22]–[24],[25]. Para el ingreso de la señal se toma como referencia señales con presencia de armónicos, mediante generadores no lineales,

tales como eólicos o fotovoltaicos que es donde existe mayor presencia de armónicos [26].

Considerando lo expuesto previamente, se propone utilizar en el análisis de Armónicos el modelo de resolución FFT, [26] ya que es una opción bastante sencilla de interpretar y representar la transferencia de armónicos a través de la línea, así como otros elementos como son los transformadores y las cargas, además se analiza los índices de armónicos tanto en voltaje como en corriente, mediante DHT, Distorsión Total de la Demanda (TDD) [5].

En adelante se desarrolla el Análisis de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia en la sección 2; para luego pasar a Formulación del Problema en la sección 3; continúa con la Aplicación del Modelo en la sección 4; y por último se concluye los resultados de la investigación en la sección 5.

2. Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

2.1 Armónicos y sus generalidades

Los armónicos se originan bajo dos principales fuentes de distorsión como son: dispositivos de conmutación electrónica, que pueden o no ser sincronizado con la tensión alterna; y dispositivos con reacción de tensión y corriente no lineales, tal es el caso, de reactores con núcleos de hierro y cargas con arcos que al ser excitados con una tensión de frecuencia periódica el voltaje no lineal conduce a la generación de corrientes armónicas. La propagación de armónicos en sistemas de energía son de total dependencia de las cargas no lineales, así como fuentes no lineales y que bajo un índice de coincidencia pueden afectar a elementos del SEP [3]-[27].

En la medición de transitorios se recomienda realizar la toma de muestras cada 10 segundos, el mismo que esta propuesto por la norma IEC 61000-4-30 [28].

Los límites de distorsión armónica que se establece utilizar para el estudio presenta límites de 1% en la distorsión armónica individual, y el 1.5% de distorsión armónica total según la normativa IEEE 519 [29].

Uno de los mayores componentes armónicos que ingresan a contaminar la onda fundamental de un sistema son la 3°, 5° y 7° armónica [1].

2.2 Secuencia de armónicos en función de su amplitud

Los armónicos presentan una secuencia de fase que obliga a que se dividan en secuencia cero, positiva y negativa, dependiente del desfase angular con respecto a la señal fundamental, siendo h el orden del armónico, y su desfase

ϕ_h

con respecto a la señal fundamental, quedando las componentes en las tres fases, evidenciadas en (1)-(3) [30].

$$\phi_h = \phi_h < \varphi_h \quad (1)$$

$$\phi_h = \phi_h < (\varphi_h + \phi_{\phi}) \quad (2)$$

$$\phi_h = \phi_h < (\varphi_h + \phi_{\phi}) \quad (3)$$

Donde:

ϕ_h = Amplitud del armónico h

ϕ_{ϕ} = Desfasamiento angular entre las fases AB

ϕ_{ϕ} = Desfasamiento angular entre las fases AC

Donde cada una de las componentes de las tres fases tiene un desfase de 120° cada una de ellas, por lo cual se tiene la tabla 1 de secuencia de armónicos.

Tabla 1. Secuencia de armónicos

ϕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
se_{ϕ}	+	-	0	+	-	0	+	-	0

2.3 Análisis de las señales armónicas

La técnica más utilizada para el análisis de componentes armónicas en señales es la transformada de Fourier, la cual realiza la caracterización de la misma en el dominio del tiempo.

Las series de Fourier son expresadas mediante (4) [10], [31].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)) \quad (4)$$

Siendo sus coeficientes (5)-(7):

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T} f(t) dt \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T} f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (7)$$

$n=1,2,3,\dots$

Donde:

$f(t)$ = función dependiente del tiempo
 a_0, a_n, b_n = Son coeficientes que representan las amplitudes de senos y cosenos, por el cual n es un número entero dependiente de $f(t)$ = $f(t)$ y ω_0 representa la velocidad angular fundamental

que está relacionada con $2\pi/T$, siendo T períodos

[30].

Y para efecto de paridad par o impar se tiene que, cuando $f(t)$ es par, entonces $b_n = 0$ y si $f(t)$ es impar, entonces $a_n = 0$, quedando (8) cuando es par y (9) cuando es impar.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (8)$$

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (9)$$

En el análisis de fase lo más usual es tener la amplitud y fase de la señal dando por (10):

2.3.1 Transformada de Fourier

Las señales discretas pueden ser fácilmente representadas en $f(t)$ con T períodos, en el dominio del tiempo y frecuencia expresada por

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} f_n e^{-j\omega t} \quad (14)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (14)$$

Donde:

$F(\omega)$ = Función dependiente de la frecuencia
 Esta función también se la expresa mediante

(15).

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (15)$$

Donde $F(\omega)$ es la función espectral de la función $f(t)$.

2.3.2 Transformada Discreta de Fourier

La DFT representa señales discretas donde $f(t)$ y N número de muestras en cada período, sean en el dominio del tiempo o a su vez en el dominio de frecuencia, obteniéndose (16) y (17) [31].

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (16)$$

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (17)$$

Dando como resultado (18) y (19).

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (18)$$

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (19)$$

Con lo que se encuentra la ecuación matricial (20)

$$X(k) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(n\omega_0 k) + B_n \cos(n\omega_0 k)) \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que los coeficientes de (10) están dados por (11) al (13).

$$X_0 = \frac{1}{N} \int_0^N x(t) dt \quad (11)$$

$$A_n = \frac{2}{N} \int_0^N x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (12)$$

Donde:

$$B_n = \frac{2}{N} \int_0^N x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (13)$$

A_0, A_n, B_n = Coeficientes de (10)

ϕ_n = Desfasamiento angular entre fases.

$$X(k) = -X(N-k) \quad (20)$$

Donde:

$X(k)$ = función discreta con N números de divisiones de frecuencia.

2.3.3 Transformada rápida de Fourier

Se tiene en cuenta que la Transformada FFT

con N muestras en cada período, crea los mismos componentes de frecuencia de una señal de tipo DFT, a pesar de ello, a causa de la

semejanza entre varios elementos de la matriz $[W_N^{kn}]$, únicamente se necesita $\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$

multiplicaciones y obtener la solución en (21) y (22).

$$x^{\frac{N}{2}} = x^{-\frac{2\pi}{N} \cdot \frac{N}{2}} = x^{-\pi} = -x^0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x^{\frac{N}{2}} &= x^{-\frac{2\pi}{N} \cdot \frac{N}{2}} \\ &= x^{-\pi} = -x^0 \end{aligned} \quad (22)$$

Con ello podemos decir que la FFT descompone a la señal de N ejemplares en N señales de una sola muestra cada una y de una forma progresiva [31].

2.4 Evaluación de índices de armónicos

2.4.1 Cálculo de la Distorsión de Armónica Total

Para el análisis de armónicos se tiene que la DHT

se define por el valor RMS expresado por (23) [32], [33].

$$DHT = \frac{1}{I_{1,sc}} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,sc}^2} \quad (23)$$

O también es expresada mediante (24).

$$DHT = \frac{\sqrt{I_{sc}^2 - I_{1,sc}^2}}{I_{1,sc}} \quad (24)$$

Donde:

=

$I_{h,sc}$ = Valor eficaz, del h armónico que se desee obtener desde 1 que es respecto a la fundamental hasta ∞ .

I_{sc} es el valor medio de la de la onda, siendo estas (25) y (26).

$$I_{sc}^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2 dt \quad (25)$$

$$I_{sc}^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x dt \quad (26)$$

Bajo (23) y (24) el valor de DHT y el valor RMS están relacionadas con la ecuación (28).

$$DHT = I_{1,sc} \sqrt{1 + THD^2} \quad (28)$$

También se sabe que la THD de voltaje, tiende a ser un valor aceptable siempre y cuando este no exceda el 5% y si excede el 10% se dice que obligatoriamente causarán problemas en equipos de potencia ya sean eléctricos, electrónicos y cargas en general [32], [33].

2.4.2 Distorsión Total de la Demanda,

La Distorsión Armónica Total respecto a la corriente de carga en demanda pico, viene dado por (29) [10].

$$DHT = \frac{I_L}{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}} \quad (29)$$

Donde:

I_L es la corriente de carga máxima respecto a la línea.

I_h es el valor del h -ésimo armónico.

2.4.3 Límites de distorsión de corriente

De acuerdo a la normativa de la IEEE 519-1992, se tiene que el límite de la corriente en corto

circuito bajo valores de voltaje transmisión mayores a 161 Kv, dados en la tabla 2.

Tabla 2. Máxima distorsión de corriente en porcentaje de I_L [7]

Orden de armónico impar	$\frac{I_{sc}}{I_L} < 50$	$\frac{I_{sc}}{I_L} > 50$
$h < 11$	2.0	3.0
$11 \leq h < 17$	1.0	1.5
$17 \leq h < 23$	0.75	1.15
$23 \leq h < 35$	0.3	0.45
$h \geq 35$	0.15	0.22
TDD	2.5	3.75

Dado que cuando la forma de onda cambia de una sinusoidal, a una no sinusoidal, este valor i_{sc} se debe utilizar series de Fourier para el caso, obteniéndose la ecuación (27) [32], [33].

$$i_{sc}^2 = i_{sc0}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} i_{h,sc}^2 \quad (27)$$

Donde:

I_{sc} = Corriente de cortocircuito.

I_L = Corriente de línea.

2.4.4 Límites de distorsión de Voltaje

De acuerdo a la normativa de la IEEE 519-1992, se tiene que el límite del voltaje en las peores condiciones, dados en la tabla 3.

Tabla 3. Límites de distorsión de Voltaje [6],[7]

Voltaje nominal V_n [kV]	Distorsión de Voltaje individual [%]	Distorsión de Voltaje Total THD [%]
$V_n < 69$	3.0	5.0
$69 \leq V_n < 161$	1.5	2.5
$V_n \geq 161$	1.0	1.5

3. Formulación del Problema

En la presente investigación el principal problema que se plantea es saber la calidad de energía al final de la transmisión de energía, al tener fuentes no lineales, como son generadores eólicos y fotovoltaicos, que sean representativos

cierto tipo de incidencia llegando en un futuro a tener un índice de coincidencia en un determinado nodo en común lo que puede afectar considerablemente la calidad de energía que llega a dicho nodo.

3.1 Modelo de elementos no-lineales a considerar

3.1.1 Generador sincrónico

Su representación se da como una resistencia conectada en serie junto con una reactancia que varía en función de la frecuencia. Además la interacción entre el rotor y estator del generador forma armónicos debido al número de polos que estos tengan, pero usualmente se los desprecia ya que presentan valores muy bajos al igual que su resistencia, tomándolos como no significativos; es necesario considerar la reactancia de secuencia negativa de los generadores a frecuencia fundamental como se lo expresa en la ecuación (30) [34],[10].

Siendo X_2 la reactancia de secuencia negativa, X''_d reactancia subtransitoria del eje directo, X''_q reactancia subtransitoria del eje de cuadratura; y

al tomar en cuenta el armónico en la reactancia se tiene en cuenta (31) que depende del orden del armónico presente en el generador [10].

$$X_2 = \frac{[X''_d + X''_q]}{2} \quad (30)$$

$$X_2^h = h * X_2 \quad (31)$$

Así como también se toma en cuenta la resistencia en función del orden armónico teniendo (32).

$$R_h = R * \sqrt{h} \quad (32)$$

Siendo R_h resistencia de orden armónico, y R resistencia.

Obteniéndose los modelos del generador tanto a frecuencia fundamental (a), como a frecuencias armónicas (b), como se representa en la figura 1 [10].

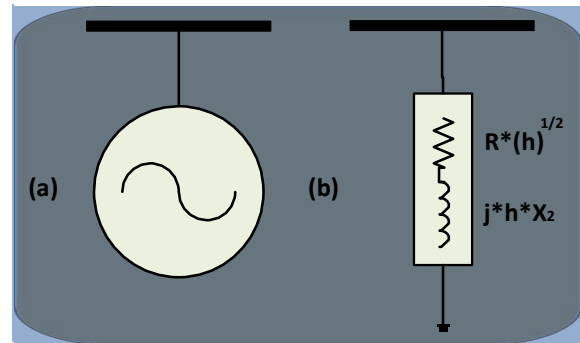


Figura 1. (a) Generador sincrónico a frecuencia fundamental, (b) generador sincrónico a frecuencia de armónicos.

3.1.2 Transformador

En los transformadores al maniobrar a su nivel máximo de operabilidad, se desprecia la parte de la magnetización del circuito equivalente, ya que la corriente producida por la magnetización es despreciable con respecto a la de la carga [23]. Por este motivo se tomó como referente al modelo π del transformador dado en la figura 2 [22], [35], [21], [36].

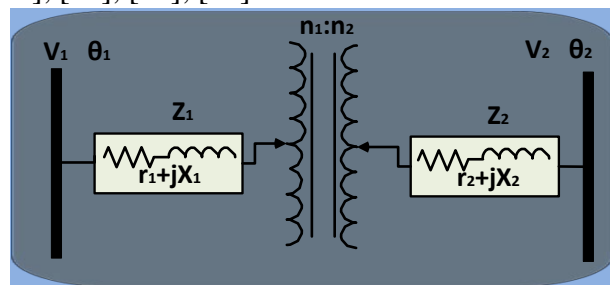


Figura 2. Diagrama general de un transformador.

Donde se considera el siguiente esquema general para el transformador PI esta dado por la figura 3.

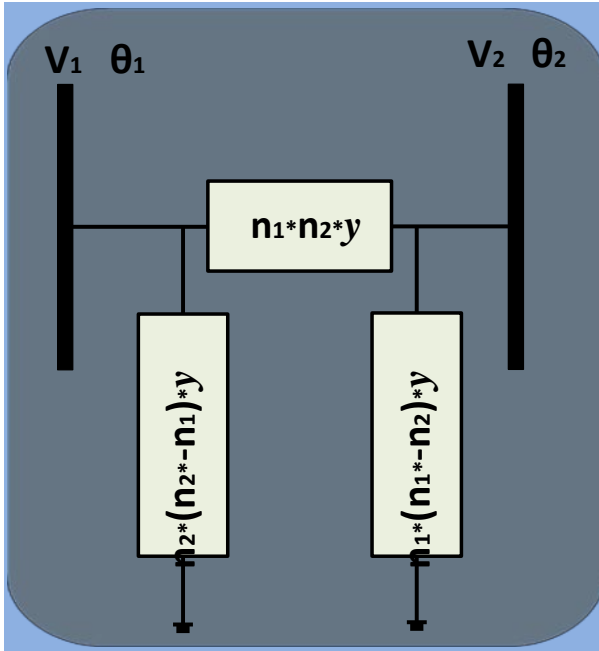


Figura 3. Diagrama π de un transformador.

Sabiendo que la admitancia de cortocircuito está dada por (33).

$$\diamond = \frac{1}{\diamond_1^2 \diamond_2 + \diamond_2^2 \diamond_1} \quad (33)$$

Donde:

- \diamond = Admitancia de cortocircuito.
- \diamond_1 = Impedancia del primario.
- \diamond_2 = Impedancia del secundario.
- \diamond_1 = Numero de vueltas del primario.
- \diamond_2 = Numero de vueltas del secundario.
- \diamond_1 = Resistencia del primario.
- \diamond_2 = Resistencia del secundario.
- \diamond_1 = Reactancia del primario.
- \diamond_2 = Reactancia del secundario.

Se tomó en cuenta la frecuencia para el análisis de armónicos en el transformador, ya que afecta directamente a su reactancia, obteniéndose (34).

$$\diamond_2^h = h * \diamond_2 \quad (34)$$

En cambio, la resistencia permanece constante porque no depende de la frecuencia. Además hay que considerar un desfase angular de $\pm 30^\circ$, el que dependerá del armónico que esté ingresando con forme a la **tabla 1**, así como

también se debe tener en cuenta el tipo de conexión que tiene el transformador [22] [35].

3.1.3 Línea larga de transmisión

Se realizó el análisis de armónicos para líneas de transmisión bajo el modelo π de parámetros distribuidos, que se puede apreciar el cálculo para la señal fundamental así como para los armónicos en la línea de transmisión larga, teniendo en cuenta que las líneas de transmisión largas son aquellas cuya longitud sobrepasa los 250 km, basado en la impedancia \diamond , admitancia \diamond y longitud de la línea \diamond que puede ser de forma

incremental para una mejor representación de la misma, se ilustra en la figura 4 [10].

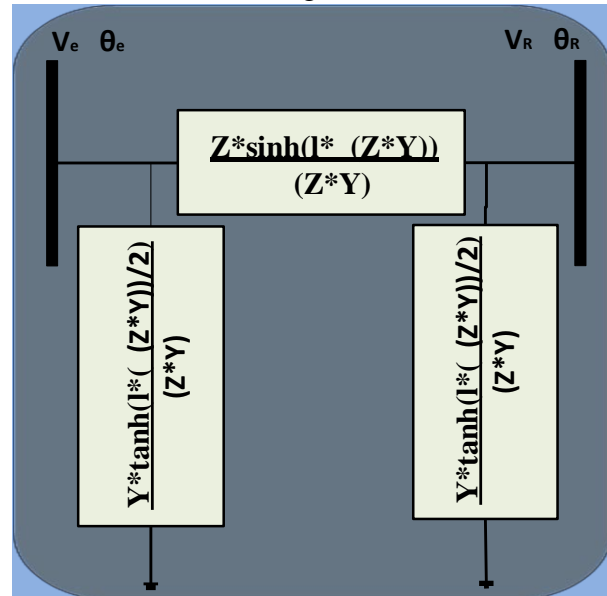


Figura 4. Diagrama π para una línea larga en transmisión.

Donde se tiene (35) y (36)

$$\diamond = R + \diamond h * \diamond_L \quad (35)$$

$$\diamond = \frac{\diamond h}{\diamond} \quad (36)$$

Donde:

- \diamond = Admitancia del circuito.
- \diamond = Impedancia del circuito.
- \diamond_L = Reactancia inductiva.
- \diamond_\diamond = Reactancia capacitiva.
- \diamond = longitud de la línea.
- \diamond_e = Voltaje emisor.
- \diamond_R = Voltaje receptor.

Identifica que sucede con los armónicos al momento de pasar por una línea de transmisión larga si esta puede o no ser filtrada, y verificar que es lo que sucede cuando no existe carga representativa, cuando existe carga no lineal representativa, cuando de por medio tenemos transformadores en los terminales de las líneas. Por esta razón para la modelación de la línea se toma a consideración la modelación de una línea PI larga, ya que es donde existen mayores efectos en la etapa de Transmisión. Para esto se desarrolló un modelo que permite analizar el comportamiento de la señal fundamental, ingresando distorsiones armónicas denominados como Superposición bajo un cierto porcentaje, que pueden afectar o no al SEP esta modelación utiliza el modelo PI en una línea de transmisión larga de 300[km] conjuntamente los elementos de necesarios. Dentro de este parámetro se ha escogido utilizar líneas de transmisión de cuyo voltaje a transferir es 230 [kV], debido a que la mayor parte del Sistema Nacional Interconectado (SNI) cuenta con un porcentaje mayoritario de líneas de 230[kV], así como la conexión con el otros países; se utiliza transformadores cuya conexión es Y/Y en el primario y secundario respectivamente, a su salida se conecta a una carga no lineal significativa que genera la presencia de armónicos [37].

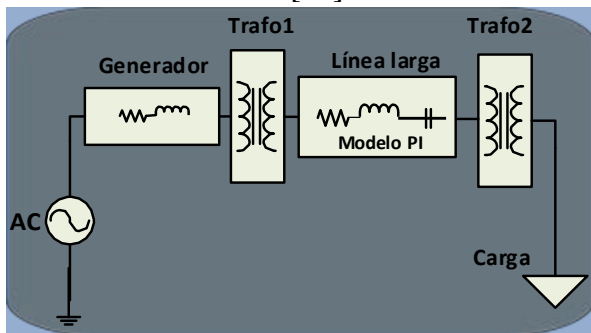


Figura 5. Diagrama de conexión simple de una línea de transmisión larga.

Se tiene como referencia a transformadores para los cuales, tomamos un modelo Yg/Yg en ambos

extremos de la línea y se consideró ideal [24], por lo que se puede encontrar los valores de la impedancia del primario (Z_p), así como los valores de la impedancia del secundario (Z_s), su

impedancia de derivación en vacío (Z_m) que permite encontrar las pérdidas de corrientes en el núcleo. Además las tensiones como las corrientes de los transformadores al estar en condiciones normales su desfase de ángulo es el mismo, ya sea en atraso u adelanto, por esta razón se toma a consideración que los transformadores trabajan con relación de transformación nominal, además si se conecta el secundario en Δ (Delta o Triángulo) este contribuye al equilibrio producido por los armónicos en especial los múltiplos de 3 que son los que más afectan al sistema, quedando (37) y (38) [10], [38], [39].

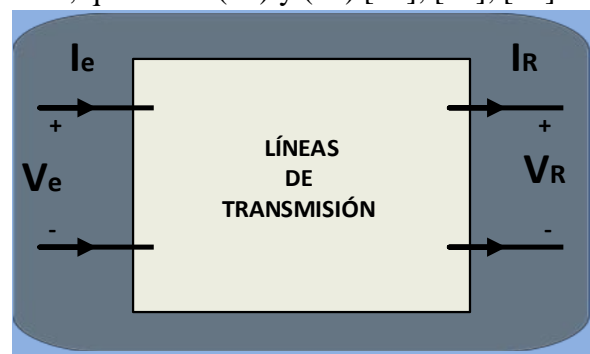


Figura 6. Gráfico de cuádrupolos en líneas de transmisión

$$I_e = A * I_R + B * V_R \quad (37)$$

$$V_e = C * I_R + D * V_R \quad (38)$$

Donde para las variables A, B, C, D dadas para las líneas largas se tiene (39)-(42):

$$A = 1 + \frac{Z_e * Z_R}{2} \quad (39)$$

$$B = Z_e * (1 + \frac{Z_e * Z_R}{6}) \quad (40)$$

$$C = Z_e * (1 + \frac{Z_e * Z_R}{6}) \quad (41)$$

$$D = 1 + \frac{Z_e * Z_R}{2} \quad (42)$$

Despejando las variables y sustituyendo los valores de (39)-(42) en (37) y (38) se tiene los voltajes y corrientes al final de la línea que son (43) y (44):

$$I_R = \frac{D * V_e - C * I_e}{A * Z_R - B} \quad (43)$$

$$V_R = \frac{A * V_e - B * I_e}{C * Z_R - D} \quad (44)$$

Donde:

$$V_e = \text{Voltaje emisor.}$$

$\diamond_R = \text{Voltaje receptor.}$

$I_e =$ Corriente de emisor.
 $I_R =$ Corriente de receptor.

Para el análisis de voltajes y corrientes de la línea, tanto emisor (V_e, I_e) como receptor (V_r, I_r) con parámetros del modelo PI para redes Largas mediante parámetros distribuidos, en la que se considera una distancia mayor a 250 [km] siendo el modelo una línea de 300 [km] de longitud, con las características de resistencia efectiva por cada fase r [Ω/km], resistencia inductiva por cada fase x [Ω/km], resistencia capacitiva por cada fase x_c [$M\Omega\text{-km}$]. Dando lugar a la modelación mediante el cálculo de la contante de propagación.

El análisis de la señal se considera la Transformada Rápida de Fourier (FFT) donde toda onda que tiene un periodo puede ser dividida como la suma de ondas sinusoidales,

quedándonos los resultados tanto de voltaje como de corriente del THD y TDD.

A continuación, se expone el algoritmo utilizado para la resolución y análisis de armónicos en el sistema simple de la línea de transmisión larga.

Algoritmo para el análisis de armónicos en redes de transmisión eléctrica

- Paso 1: **Leer variables globales:**
 $(R, L, C, \omega, h, \phi, I_e, I_R, V_e, V_r)$
- Paso 2: **Generar hiper-matriz de señales armónicas**
 Siendo h el orden de armónicos a generar y ϕ , el número de iteraciones.
 (h, ϕ)
 Datos de entrada de señal
 (w, t, ϕ)
)
 Generación de señal fundamental
 $I_{h,1} = I_e * \sin(\omega t + \phi)$
)
 Generación de señales armónicas
 Desde $i = 2$ hasta ϕ hacer y volver a repetir
 $I_{h,i} = (A/100) * I_e * \sin(i * w * t + \phi)$
- Paso 3: **Llamado a las señales armónicas**
 $I_{total} =$

$$R = R * L$$

$$I_L = I_e * L$$

$$I_e = \frac{I_L}{L}$$

Resolvemos

$$I = R + I_L$$

$$I = \frac{I_L}{L}$$

→ Si $I_e = 1$ entonces:

Encontramos la Fundamental de voltaje y corriente

$$I_R = \frac{I_e * R - I_L * x_c}{x_c - I_R * R}$$

$$I_R = \frac{I_e * R - I_L * x_c}{x_c - I_R * R}$$

→ Si $I_e \geq 1$ entonces:

Calcular modelo PI para la hipermatriz de señales generada, entonces:

$$I = R + I_h * I_L$$

$$I = \frac{I_h}{I_L}$$

I de voltaje y

Encontramos los v

alores

corriente con armónicos

$$I_R = \frac{I_e * R - I_L * x_c}{x_c - I_R * R}$$

$$I_R = \frac{I_e * R - I_L * x_c}{x_c - I_R * R}$$

Paso 4: **Número de señales generadas**

$$R =$$

Almacenamos cada iteración en las salidas:

$$(R, R)$$

Paso 6: **Superposición de hipermatriz de resultados.**

→ Hipermatriz de:

Voltaje (R), siendo h el orden de armónicos generados y n = orden de iteraciones generadas

$$\sum_{n=1} \sum_{h=1} (R(n, :))$$

$$\#_n = ((h - 1) * n) + 1$$

Paso 5: **Resolución del modelo PI**

Si PI esta con carga

Desde $n = 1$ hasta n datos del

vector

Corriente (R), siendo $h =$ el

orden de armónicos generados y $n =$ orden de iteraciones generadas

$$\sum_{n=1} \sum_{h=1} (R(n, :))$$

$$n=1 \quad h=1$$

Salidas:

$$(R)$$

$$(R)$$

Paso 7: **Análisis de las señales**

→ Resuelve la ecuación de THD

$$= \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,n}^2}$$

→ Resuelve valores de TDD

$$\text{Salidas:} = \left(\sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^2}} \right)$$

Paso 8: **Fin del algoritmo**

4. Análisis de resultados

Utilizado el modelamiento se realiza primero el resultado de la modelación de voltajes y corrientes por cada uno de los elementos que se va a conectar, para luego de cada resultado ser transferido los valores de voltajes y corrientes, de la salida de cada elemento a hacia las entradas de cada elemento subsecuente, permitiéndonos tener una consecución más real de los fenómenos que se dan al tener los elementos conectados como uno solo.

4.1 Datos generales de elementos considerados

En la generación de señal fundamental se dio valores de voltaje de transmisión de 230 [kV], como se explicó en el apartado 3. En la Línea se desarrolló con los siguientes datos de línea; resistencia efectiva por cada fase $r=0.0435$ [Ω/km], resistencia inductiva por cada fase $x_l=0.435$ [Ω/km], resistencia capacitiva por cada fase $x_c=0.968$ [$\text{M}\Omega\text{-km}$].

4.2 Caso 1, Línea con carga y 1 iteración

4.2.1 Solo señal fundamental

Damos una señal fundamental y se puede observar que al existe una variación del 0.3187% con respecto al voltaje y del 7.7191e+03% con respecto a la corriente, como se lo muestra en la tabla 5.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al ingreso y al final de la trasmisión, al no ingresar ninguna señal armónica, se tiene en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	229.2671	0.0354	2.7645

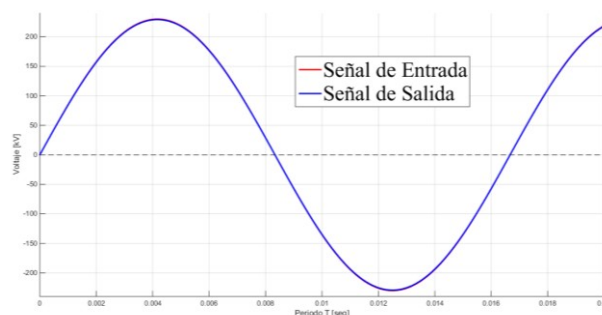


Figura 7. Señal fundamental de voltaje al ingreso y salida de la línea PI

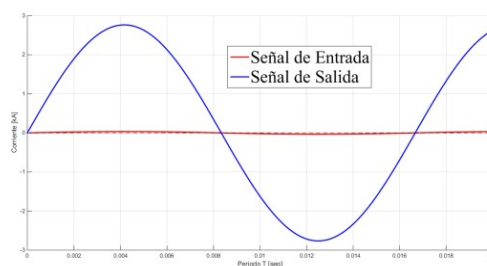


Figura 8. Señal fundamental de corriente al ingreso y salida de la línea PI

Los valores de caída de tensión y corriente de la señal fundamental están dados por la tabla 5.

Tabla 5. Caídas de tensión y corriente en la línea

η_v [%]	η_ϕ [%]
0.3187	7.7191e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal fundamental son nulos, como se especifica en la tabla 6. Valores de THD y TDD de la señal fundamental.

Tabla 6. THD y TDD de la señal fundamental

THD [%]	TDD [%]
0	0

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992 en la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.2.2 La señal fundamental más los dos primeros armónicos, con una sola iteración

Para este caso se superponen dos señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 10, se hallan 3 señales en total.

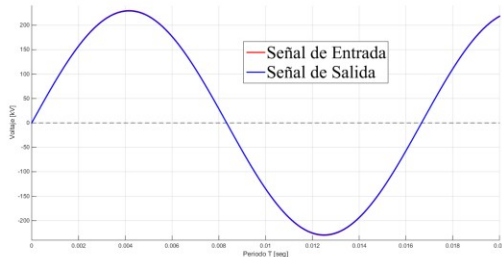


Figura 9. Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

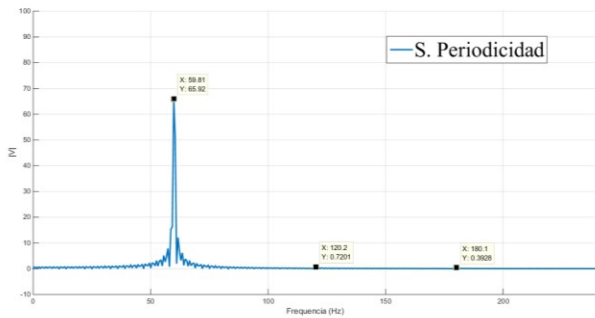


Figura 10. Periodograma de la señal total

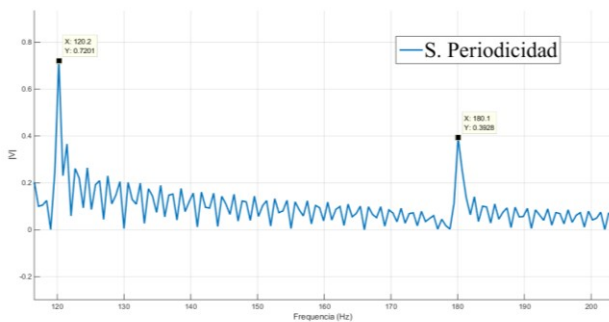


Figura 11. Periodograma de la señal en los 2h y 3h

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental más los dos primeros armónicos, están dados por la tabla 7.

Los valores de caída de tensión y corriente expresados en la tabla 8.

Y los valores de THD y TDD de la señal fundamental son no nulos, como se especifica en

la tabla 9 Valores de THD y TDD de la señal final.

Tabla 7. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 3h.

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	228.2338	0.0354	2.7603

Tabla 8. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 3h

η_v [%]	η_ϕ [%]
0.7679	7.7072e+03

Tabla 9. THD y TDD de la señal fundamental hasta 3h

THD [%]	TDD [%]
0.2554	0.1335

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 3 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.2.3 La señal fundamental más los cuatro primeros armónicos, con una sola iteración

Para este caso se superponen dos señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 13, se hallan 5 señales en total.

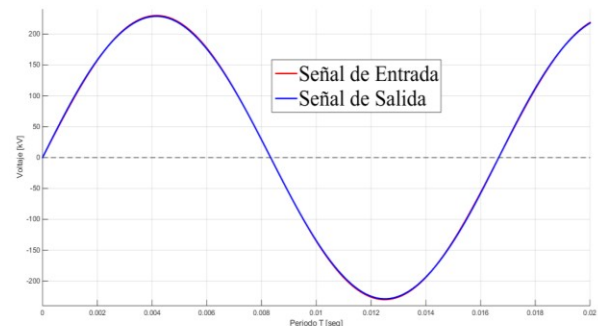


Figura 12. Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

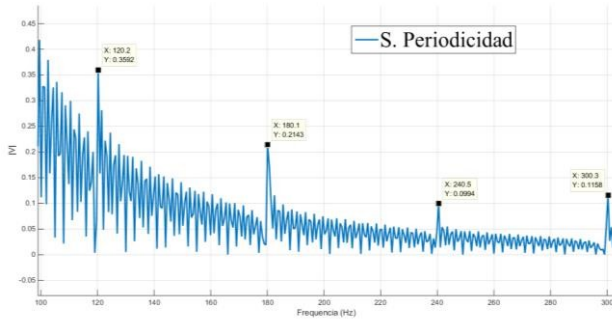


Figura 13. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h y 5h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, más los cuatro primeros armónicos, están dados por la tabla 10.

Tabla 10. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 5h

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	229.6333	2.7650	2.7650

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental están dados por la tabla 11.

Tabla 11. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 5h

ΔV	η_{ϕ} [%]
0.1594	7.7205e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal fundamental son no nulos, como se especifica en la tabla 12 Valores de THD y TDD de la señal final.

Tabla 12. THD y TDD de la señal fundamental hasta 5h

THD [%]	TDD [%]
0.1937	0.1222

4.2.4 La señal fundamental más los seis primeros armónicos, con una sola iteración

Para este caso se superponen seis señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 15, se hallan 7 señales en total.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y final de la transmisión, se tiene en la tabla 13.

Tabla 13. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 7h

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	229.6568	2.7650	2.7654

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental están dados por la tabla 14.

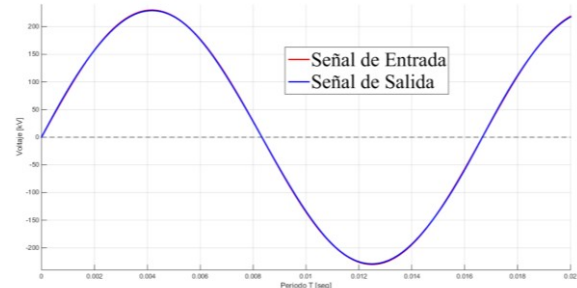


Figura 14. Señal de voltaje con superposición de 6 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

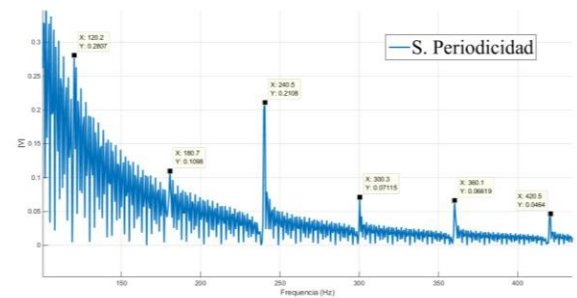


Figura 15. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h y 7h.

Tabla 14. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 7h

η_v [%]	η_{ϕ} [%]
0.1492	7.7216e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total, se especifica en la tabla 15 Valores de THD y TDD de la señal fundamental.

Tabla 15. THD y TDD de la señal fundamental hasta 7h

THD [%]	TDD [%]
0.2227	0.1232

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 7 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar

que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.2.5 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con una sola iteración

Para este caso se superponen ocho señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 16, se hallan 9 señales en total.



Figura 16. Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y una iteración con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

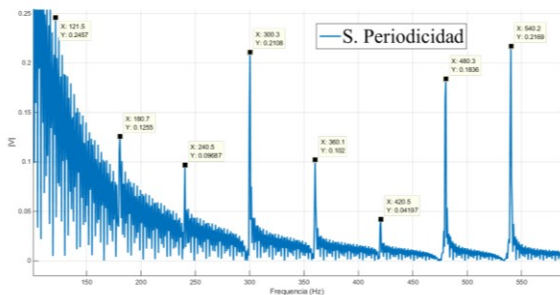


Figura 17. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y al final de la transmisión, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h

V_{in} [kV]	V_{out} [kV]	I_{in} [kA]	I_{out} [kA]
230.00	229.4759	0.0354	2.7640

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental están dados por la tabla 17.

Tabla 17. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h

η_v [%]	η_ϕ [%]
0.2279	7.7176e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total, se especifica en la tabla 18 Valores de THD y TDD de la señal fundamental.

Tabla 18. THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h

THD [%]	TDD [%]
0.2712	0.1379

4.3 Caso 2, Línea con carga y 10 iteraciones

4.3.1 La señal fundamental más los dos primeros armónicos, con diez iteraciones.

Para este caso se superponen dos señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 18, y se hallan 21 señales superpuestas en total.

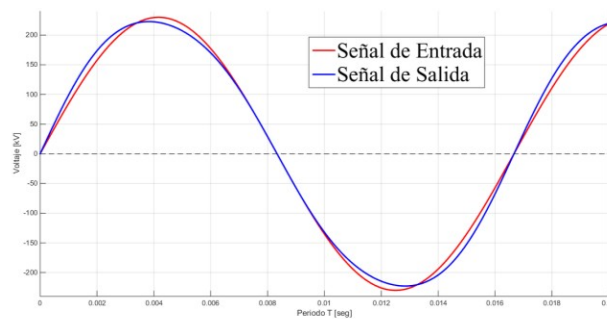


Figura 18. Señal de voltaje con superposición de 2 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

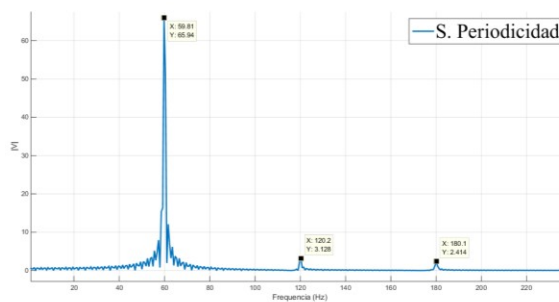


Figura 19. Periodograma de la señal total

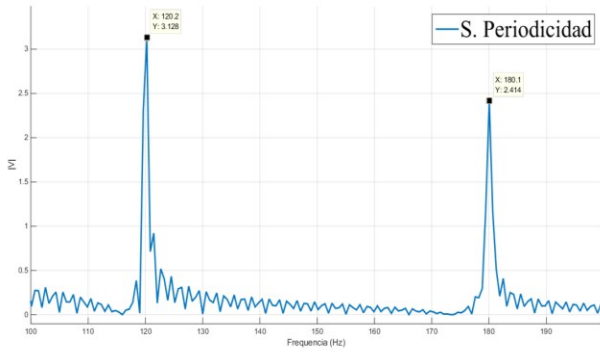


Figura 20. Periodograma de la señal en los 2h y 3h

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y al final de la trasmisión, como se especifica en la tabla 19.

Tabla 19. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 3h.

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	220.1452	0.0354	2.7266

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental están dados por la tabla 20

Tabla 20. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 3h

ΔV	η_{ϕ} [%]
4.2847	7.6119e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total, como se especifica en la tabla 21.

Tabla 21. THD y TDD de la señal fundamental hasta 3h

THD [%]	TDD [%]
1.7558	0.5423

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 21 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.3.2 La señal fundamental más los cuatro primeros armónicos, con diez iteraciones.

Para este caso se superponen cuatro señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 21, se hallan 41 señales en total.

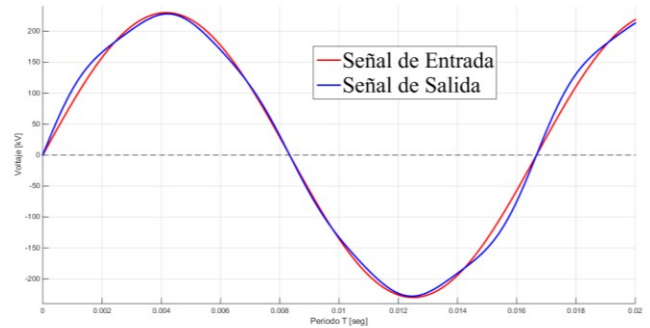


Figura 21. Señal de voltaje con superposición de 4 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

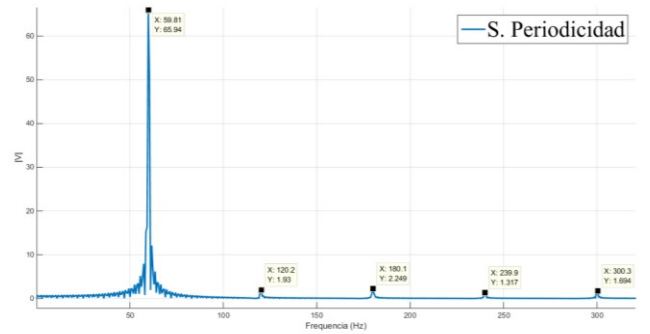


Figura 22. Periodograma de la señal en los 1h 2h, 3h, 4h y 5h.

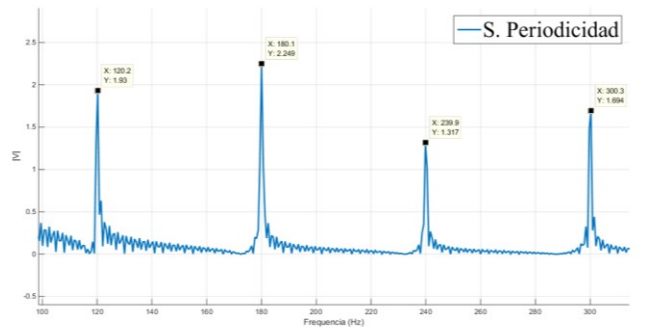


Figura 23. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h y 5h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y al final de la trasmisión, se tiene en la tabla 22.

Tabla 22. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 5h

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	231.4075	0.0354	2.7598

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal fundamental están dados por la tabla 23.

Tabla 23. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 5h

η_v [%]	η_ϕ [%]
0.6120	7.7058e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total, se especifica en la tabla 24.

Tabla 24. THD y TDD de la señal fundamental hasta 5h

THD [%]	TDD [%]
1.6006	0.4486

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 41 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.3.3 La señal fundamental más los seis primeros armónicos, con diez iteraciones.

Para este caso se superponen seis señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 24, se hallan 61 señales superpuestas en total.

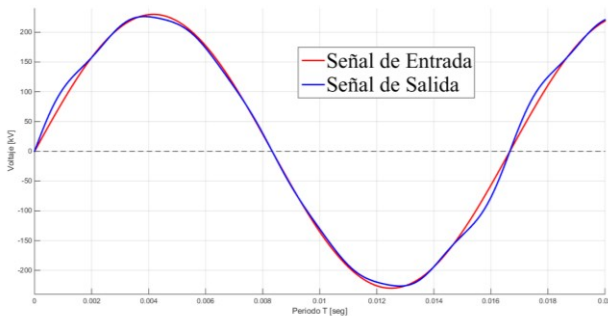


Figura 24. Señal de voltaje con superposición de 6 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

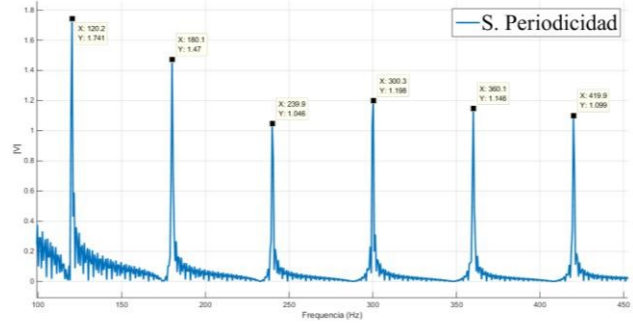


Figura 25. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h y 7h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y al final de la transmisión, se tiene en la tabla 25.

Tabla 25. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 7h

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	226.7267	0.0354	2.7544

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal total están dados por la tabla 26.

Tabla 26. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 7h

η_v [%]	η_ϕ [%]
1.4232	7.6905e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total, se especifica en la tabla 27.

Tabla 27. THD y TDD de la señal fundamental hasta 7h

THD [%]	TDD [%]
1.2119	0.3446

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 61 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.3.4 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con diez iteraciones.

Para este caso se superponen ocho señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 26, se hallan 81 señales superpuestas en total.

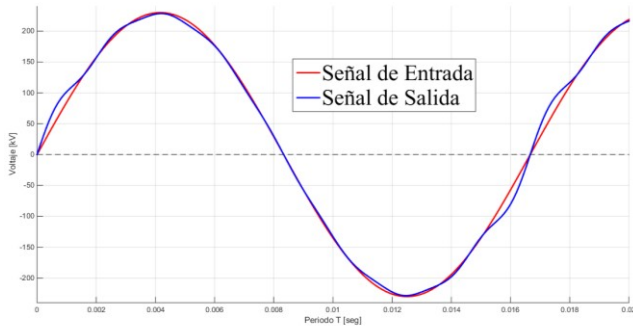


Figura 26. Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y diez iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

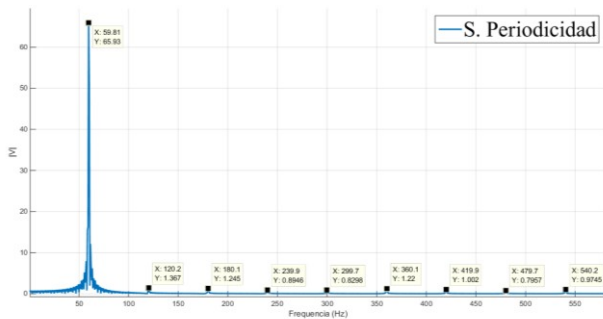


Figura 27. Periodograma de la señal en los 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.

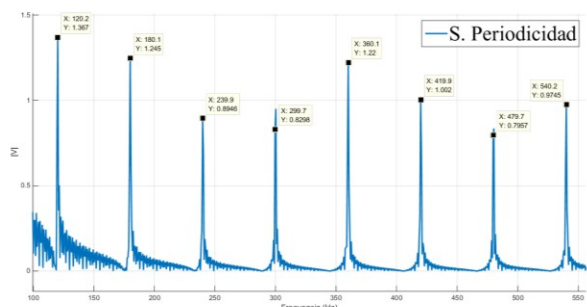


Figura 28. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al ingreso y al final de la transmisión, al no ingresar ninguna señal armónica, se tiene en la tabla 28.

Tabla 28. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	229.3020	0.0354	2.7569

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal total están dados por la tabla 29.

Tabla 29. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h

η_v [%]	η_ϕ [%]
0.3035	7.6974e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total se especifica en la tabla 30.

Tabla 30. THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h

THD [%]	TDD [%]
1.3028	0.3147

Con estos valores se puede afirmar que no excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 81 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

4.3 Caso 3, Línea con carga y 30 iteraciones

4.3.1 La señal fundamental más los ocho primeros armónicos, con treinta iteraciones.

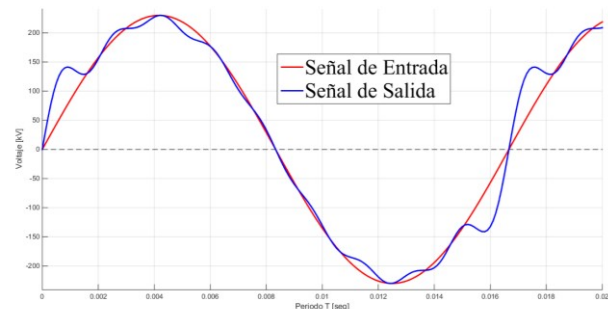


Figura 29. Señal de voltaje con superposición de 8 primeras armónicas y treinta iteraciones con la fundamental al ingreso y salida de la línea PI

Para este caso se superponen ocho señales armónicas a la señal fundamental quedando la forma de onda de voltaje en la figura 29, se hallan 241 señales en total.

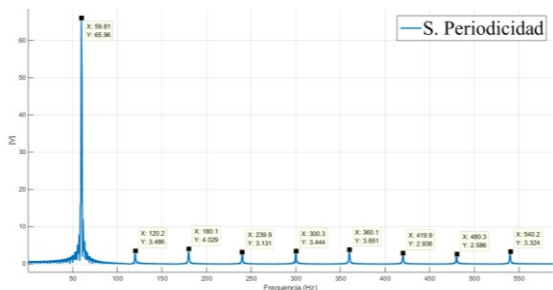


Figura 30. Periodograma de la señal total 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.

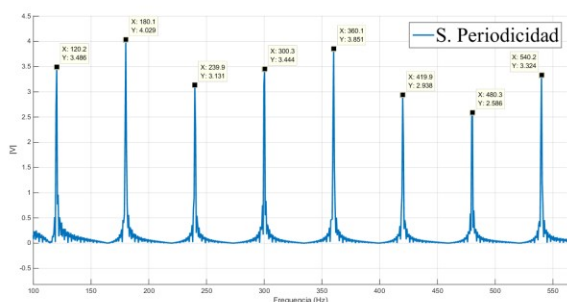


Figura 31. Periodograma de la señal en los 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h y 9h.

Al ingresar la señal se tiene su valor de voltaje, corriente al inicio y al final de la trasmisión en la tabla 31.

Tabla 31. Valores de voltaje y corriente al inicio y final de la línea hasta 9h.

Vin [kV]	Vout [kV]	Iin [kA]	Iout [kA]
230.00	226.8847	0.0354	2.7338

Los valores de caída de tensión y corriente, de la señal total están dados por la tabla 32.

Tabla 32. Caídas de tensión y corriente en la línea hasta 9h

ΔV	η_{ϕ} [%]
1.3545	7.6323e+03

Y los valores de THD y TDD de la señal total se especifica en la tabla 33.

Tabla 33. THD y TDD de la señal fundamental hasta 9h

THD [%]	TDD [%]
3.7314	0.8384

Con estos valores se puede afirmar que excede el límite permisible de THD en la señal como lo tenemos en la tabla 3 de la IEEE 519-1992, bajo una superposición de 241 señales incluido la señal fundamental, así como también se puede afirmar que la caída de tensión es menor al 5% lo cual está dentro del rango moderado según la normativa para la transmisión de energía en alta tensión.

5. Conclusiones

Si en un sistema existe un incremento de elementos que disponen de electrónica de potencia, sean estos fuentes no lineales o cargas no lineales, conectados a un determinado nodo, estos dependiendo del porcentaje de armónicos que se genere cada uno, pueden llegar a superponerse y deformar un determinado índice de distorsión THD, pudiendo ser perjudicial a la calidad de energía que se desee entregar al final de la transmisión, como se puede ver en la tabla 33, donde su THD es el 3.7314% y excede los valores permisibles de THD de la normativa IEEE 519-1992 en que la armónica total está dado por los valores de la tabla 3.

Al ingresar un bajo índice de armónicos en una señal, y transmitir las por una línea estas no causan mayores complicaciones como se pudo hacer referencia en los dos primeros casos que no sobrepasamos los índices permisibles de THD para una señal.

Se puede observar que la señal transferida con armónicos se filtra al final de este elemento del SEP un cierto porcentaje, en base al índice de coincidencia el mismo que tiene que ser alto, puede generar problemas por calidad de energía.

6. Referencias

- [1] J. Zhu, D. Xie, F. Wang, and T. Cao, "Study on the Harmonics of Switching Power Supply," *ScienceDirect*, vol. 29, pp. 2098–2102, 2012.
- [2] S. K. Jain and S. N. Singh, "Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 9, pp. 1754–1766, 2011.
- [3] S. J. Ranade and W. Xu, "An overview of harmonic modeling and simulation," *calvin.edu*, 1998.
- [4] M. H. Hayes, *STATISTICAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING AND MODELING*, 1^a edition. New York: Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [5] J. Arcila and I. E. S. A, "Armónicos en sistemas eléctricos," no. November. 2016.
- [6] R. N. C.- 003/08 and CALIDAD, "Calidad Del Transporte De Electricidad Y Del Servicio De Transmisión Y Conexión En El Sistema Nacional Interconectado," QUITO, ECUADOR, 2008.
- [7] D. Committee, I. Power, and E. Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society," vol. 2014, 2014.
- [8] P. E. Consulting, E. Yericho, T. H. Distortion, and E. Harmonics, "Harmonics what are they how to measure them and how to solve the problem," *Electr. Electron. Eng. Isr.*, 1996.
- [9] IEEE, "Recomendacione Prácticas y reuerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia," *Potencia*. 1992.
- [10] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2^o Edition., vol. 1, no. c. WILEY, 2003.
- [11] S. Winograd, T. J. IBM, and W. R. Center, "On computing the Discrete Fourier Transform," *Analysis*, vol. 73, no. 4, pp. 1005–1006, 2009.
- [12] A. G. Timothy, "Harmonic Power flow Determination using The Fast Fourier Transform," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 2, pp. 530–535, 1991.
- [13] G. Leclerc and S. W. M. Building, "FAST FOURIER TRANSFORMS: A TUTORIAL REVIEW AND A STATE OF THE ART," *Signal Process. IEEE Trans.*, vol. 19, 1990.
- [14] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series," *Math. Comput.*, vol. 19, no. 90, p. 297-, 1965.
- [15] Y. Baghzouz *et al.*, "Time-varying harmonics: Part I - Characterizing measured data," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 3, pp. 938–944, 1998.
- [16] S. G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, 1989.
- [17] A. Grossmann and J. Morlet, "Decomposition of Hardy Functions Into Square Integrate Wavelets of constant shape," *SIAM J. Math. Anal.*, vol. 15, no. 4, 1984.
- [18] N. O. A.-O. N.E. Huang, *The Hilbert–Huang Transform in Engineering*, 1st ed. BOCA RATON: CRC Press, 2005.
- [19] N. Huang *et al.*, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
- [20] L. R. Rabiner and R. W. Schafer, "The Chirp z-Transform Algorithm," *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, vol. 17, no. 2, pp. 86–92, 1969.
- [21] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1^o Edition. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [22] J. Bonilla Sanchez and E. Cazco, "Transacciones y remuneración de potencia reactiva en el MEM,"

- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2001.
- [23] J. a Martínez-Velasco and F. de León, “Circuito equivalente de un transformador con regulación,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 19, pp. 93–109, 2011.
- [24] Y. Liu, M. Marz, T. Ortmeyer, and V. Rajagopalan, “Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 579–587, 1999.
- [25] D. Frey, J. L. Schanen, S. Quintana, M. Bollen, and C. Conrath, “Study of high frequency harmonics propagation in industrial networks,” in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2012, pp. 8–12.
- [26] L. Ciufu, C.-L. Popescu, and M.-O. Popescu, “Experimental mitigation techniques to reduce the Total Harmonic Distortion of low voltage non-linear power sources,” *2017 10th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng.*, pp. 138–141, 2017.
- [27] A. Medina *et al.*, “Harmonic analysis in frequency and time domain,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1813–1821, 2013.
- [28] J. Balcells, “Calidad de la red eléctrica:¿ como medirla?,” *Online <http://www.jcee.upc.es/JCEE2001/PDFs>*, pp. 22–26, 2001.
- [29] E. Téllez Ramírez, “Distorsion Armonica,” *Autom. Product. Y Calid. S.a. C.V*, no. 222, pp. 1–31, 2008.
- [30] G. E. Constante Flores and J. A. Játiva Ibarra, “FLUJO DE POTENCIA DE ARMÓNICOS UTILIZANDO MATLAB,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2014.
- [31] E. Chu, *Discrete and Conitnuous Fourier Transforms*, 1°. Guelph, Ontario, Canada: Chapman & Hall, 2008.
- [32] G. Salazar and V. Franklin,

- “Modelamiento de THD producido por el uso de cocinas eléctricas de inducción residencial en la red de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [33] L. F. BEDOYA AYORA and F. VÁZQUEZ, “MODELADO DEL THD EN LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE INDUCCIÓN RESIDENCIALES,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, 2015.
- [34] G. D. Petropol Serb and I. Petropol Serb, “Study of the harmonics of current and voltage for a synchronous generator in the context of railway constraints,” *2016 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2016*, pp. 1149–1154, 2016.
- [35] J. C. H. Heredia, “Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 1997.
- [36] A. Gomez-Expósito, A. J. Conejo, and C. Cañizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*, 1^o Edition. New York, 2009.
- [37] CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), “Perspectiva y Expansión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano,” QUITO, ECUADOR, 2013.
- [38] A. Gómez Exposito, J. Martínez Ramos, J. Rosendo Macías, E. Romero Ramos, and J. Riquelme Santos, *Sistemas Eléctricos de Potencia, Problemas y ejercicios resueltos*, PEARSON ED. Madrid: Pearson Edication, 2003.
- [39] D. Mauricio, L. Lipez, M. Antonio, and L. García, “ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA,” 2012