

Métodos de simulación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia

Harmonic simulation methods in power systems

Carlos Andrés Barrera-Singaña¹, Alex David Valenzuela-Santillán²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. cbarrera@ups.edu.ec;

²Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. avalenzuela@ups.edu.ec

Recibido: 6 de marzo de 2020 Aceptado: 26 de mayo de 2020

Resumen– La simulación de armónicos en sistemas de potencia puede realizarse mediante métodos que empleen la dependencia temporal o la dependencia frecuencial de los sistemas eléctricos. Todos los métodos detallados requieren de la solución de las ecuaciones de la red, y es en la forma de estas ecuaciones que los métodos se diferencian. La robustez y rápida convergencia hacen que unos métodos sean más empleados, porque pueden entregar resultados más precisos. Los diversos componentes de la red deben ser modelados apropiadamente para que puedan reflejar su comportamiento cuando las variables de estado del sistema tienden a coger formas altamente distorsionadas y para esto se deben tomar los modelos que se detallan en la literatura. Una vez que se realizan simulaciones de armónicos, se deben comparar los resultados obtenidos con aquellos límites que figuran en normativas específicas de calidad de energía y, en caso de ser excesiva la emisión el paso por seguir es el diseño de estrategias o sistemas de mitigación de armónicos.

Palabras clave– Simulación de armónicos, métodos de simulación de armónicos, elementos no lineales.

Abstract– Harmonic simulation on power systems can be performed using methodologies which are focused on time and frequency domain. The solution of power systems under harmonics require a complete and detailed solution of grid equations, and consequently, different techniques and methodologies are used to solve these equations, since robust and fast convergence can ender more precise results. On the other hand, not

only methodologies are important, but also component models, which are a mathematical representation of real behavior of electrical devices on power systems. Set in this context, models and techniques are essential to simulate and obtain results, which are measured and compared with international standards on electric power quality; subsequently, impacts and possible techniques for power quality improvement by mitigation of harmonics could be proposed.

Keywords– Harmonic domain, hybrid frequency-time domain, nonlinear elements, time-varying.

1. INTRODUCCIÓN

La inmensurable dependencia de la sociedad hacia el suministro de energía eléctrica ha llevado al incremento y mejora de los sistemas de generación, transmisión y distribución, manteniendo índices de calidad y confiabilidad. Es así, que la calidad de suministro eléctrico en la actualidad es el punto central de investigación por parte de las empresas eléctricas, debido a la importancia y responsabilidad con el usuario final, ya que se ven afectados principalmente por la distorsión de las ondas de los parámetros eléctricos. En este contexto, efectos de armónicos y distorsión en la red eléctrica pueden ser determinados y analizados mediante la correcta modelación de los componentes del sistema, considerando su efecto no lineal.

Los sistemas eléctricos han sido estudiados y analizados desde diferentes perspectivas, por ejemplo, algunos autores se enfocan en la modelación del sistema de distri-

bución considerando la influencia de nuevas tecnologías, tales como sistemas de generación distribuida, vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía, considerando sus ventajas, desventajas e impactos en los índices de confiabilidad y de calidad del suministro eléctrico [1]-[4] the impacts of biogas power plants and photovoltaic (PV). Por ejemplo, Caldeira [5] incorpora en su análisis los impactos que se tienen en los sistemas eléctricos, debido a la incorporación de cargas no lineales en la red eléctrica y sistemas de baterías de almacenamiento de energía mediante simulaciones en tiempo real en equipos OPAL. Por otra parte, En la literatura encontramos que algunos trabajos se enmarcan en la modelación del sistema de distribución, considerando las ventajas de la automatización de la red de distribución, enfocándose en la implementación de componentes electrónicos, tales como compensadores estáticos, componentes de corte y seccionamiento, sistemas avanzados de comunicación, e interconexión de cargas no lineales y los efectos de estos componentes en el resto del sistema eléctrico [6]-[9]

Bajo este escenario, los efectos producidos por cargas no lineales, tales como convertidores, FACTS, saturación magnética de los materiales, lámparas fluorescentes, hornos de arco, así como técnicas de mitigación y reducción de estos efectos, han sido determinados y analizados con la teoría clásica de fasores que giran a velocidad constante, por ende, y por varias décadas se han desarrollado métodos de simulación que puedan recrear una red con variables de estado distorsionadas [10], [11]. En la literatura podemos encontrar técnicas y metodologías desarrolladas para simulación, basadas en el dominio de la frecuencia, dominio del tiempo, o métodos híbridos que combinan el dominio del tiempo y frecuencia en las simulaciones. Conceptualización, modelos, técnicas de simulación y casos de estudio han sido analizados usando el dominio de la frecuencia y del tiempo [12], [13][13] avances más notorios han sido llevados a cabo considerando técnicas matemáticas más sofisticadas para la modelación de las cargas no lineales conectadas al sistema de distribución [14] mientras que en [15] se analiza la interacción de los armónicos de voltaje y corriente en una matriz de acoplamiento de rápido procesamiento en el dominio de la frecuencia y se compara con una modelación en el dominio del tiempo.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en la modelación y simulación del comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia, cuando existen elementos que causen distorsión de la forma de onda de voltaje o corriente, en donde se obtienen como resultados la frecuencia e impedancia de resonancia, así como el espectro armónico, los cuales sirven como base para cuantificar los efectos de la distorsión en la red eléctrica. La organización del proyecto sigue los siguientes lineamientos: Sección 2, expone los diferentes componentes y conceptualizaciones utilizadas en el proyecto. Sección 3, analiza las diferentes técnicas y metodologías para modelar y simular sistemas eléctricos donde existe distorsión en las variables de estado. Análisis de resultados y simulaciones del caso de estudio propuesto son

presentadas en Sección 4, mientras que finalmente la Sección 5 indica las conclusiones y aportes futuros del proyecto.

2. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE ARMÓNICOS

Los métodos que se encuentran difundidos en la literatura se basan tanto en análisis en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo; además de métodos híbridos, derivados de los métodos principales; estos últimos también se han desarrollado para combinar sus ventajas individuales [12]. A continuación, se detallan los principios de estos métodos.

a. Métodos en el dominio de la frecuencia

i. Método directo

La respuesta de frecuencia en una barra se puede obtener mediante la inyección de una corriente de valor 1.0 por unidad en un rango de frecuencias discretas, el proceso se basa en la solución de la ecuación de red (1).

$$[Y] \cdot V = I \quad (1)$$

Siendo [Y] la matriz de admitancias de barra, V el vector voltaje de barra e I el vector de inyección de corrientes con un solo elemento diferente de cero. Con la solución de la Ecuación (1) se encuentra en el vector de voltajes de barra para la inyección de corriente a una frecuencia dada. Este método es efectivo para determinar condiciones de resonancia serie o paralelo. En redes con varias fuentes de distorsión armónica, el método no es recomendado porque las corrientes armónicas se propagan por todo el sistema [16].

ii. Método iterativo

El método iterativo por sus siglas en inglés IHA, nace con la finalidad de considerar la variación de la inyección de corrientes armónicas con respecto a variaciones o distorsiones de voltaje. En este método se debe considerar que las fuentes de armónicos se modelan como fuentes de corriente controladas por voltaje, representada para cada iteración como una fuente de corriente fija. Previo al análisis de armónicos se debe resolver el flujo de potencia a frecuencia fundamental para hallar la primera estimación de los voltajes en todas las barras, además se debe calcular la matriz de admitancias de barra para todas las frecuencias con los modelos característicos de todas las cargas.

Con los resultados del flujo de potencia se calculan las corrientes en las cargas no lineales a frecuencia fundamental, que junto al espectro típico de las cargas se puede calcular la primera aproximación de las fuentes de corriente para cada frecuencia armónica. Se resuelve la Ecuación (1), y estos voltajes se utilizan para calcular las corrientes armónicas de la siguiente iteración. El proceso iterativo termina una vez que las variaciones de corriente entre la iteración actual y la anterior sean muy pequeñas. La desventaja que presenta este método es su característica lenta de conver-

gencia. Para mejorar la característica de este método se han desarrollado algoritmos de doble iteración [16].

iii. Método de flujo de potencia armónico

Este método considera la dependencia de la potencia de la carga con respecto al voltaje. La solución por este método se basa en el proceso de linealización alrededor de un punto de operación, que debe ser cercano al punto de operación real. El proceso de linealización consiste en hallar equivalentes Norton para frecuencias armónicas, considerando cualquier desbalance en el sistema [12][16]. Los principales pasos para seguir aplicando este método son los siguientes:

- Resolver el flujo de potencia a frecuencia fundamental.
- Construir la matriz de admitancias de barra para todas las frecuencias.
- Linealizar cada componente para valores cercanos a un punto de operación I_b y V_b como se indica en las ecuaciones (2) y (3).

$$\Delta V = V - V_b \quad (2)$$

$$\Delta I = I - I_b \quad (3)$$

Para cada función no lineal, la Ecuación linealizada queda expresada como se muestra en la Ecuación (4).

$$\Delta I = [F] \cdot \Delta V \quad (4)$$

Siendo $[F]$ el Jacobiano que relaciona voltajes y corrientes, y cuya estructura es igual a la una matriz de Toeplitz como se indica en [16] haciendo referencia a [17]. Reemplazando las ecuaciones (2) y (3) en (4) se obtiene la Ecuación (5).

$$I = [F] \cdot V + I_N \quad (5)$$

El vector I_N corresponde al equivalente Norton para los elementos no lineales y representa el proceso de linealización.

$$I_N = I_b - [F] \cdot V_b \quad (6)$$

- Combinando los elementos lineales y no lineales de la red a través de la matriz de admitancias de barra unificada (elementos lineales y equivalentes Norton) se tiene la Ecuación (7).

$$\Delta I = [Y_j] \cdot \Delta V \quad (7)$$

Donde ΔI es el vector de incrementos de corriente con la contribución de elementos no lineales y ΔV es el vector de incrementos de voltaje.

- Resolver la Ecuación (7) para calcular los voltajes armónicos.
- Comprobar si se cumple el criterio de convergencia, caso contrario el proceso se repite desde el paso 3.

La particularidad de este método es que tiene una metodología robusta y que tiene buena característica de convergencia, además que en los últimos años se han desarrollado varios modelos detallados de todos los componentes de la red.

iv. Método dinámico

En [12] se hace referencia a la formulación del balance instantáneo de potencia en la representación de las cargas lineales y no lineales. Este método aún se encuentra en materia de investigación.

v. Método de acoplamiento de matrices de admitancias de barra

Este método consiste en acoplar las matrices de admitancia de barra de secuencia positiva, negativa y cero en una misma ecuación. Por ejemplo, los convertidores AC/DC pueden ser modelados utilizando la Ecuación (8).

$$I = Y^{(1)} \cdot V + Y^{(2)} \cdot V - Y^{(0)} \cdot E_{dc} \quad (8)$$

Donde I es la corriente en el lado AC del convertidor, V es el voltaje en el lado AC del convertidor y E_{dc} es el voltaje en el lado de la carga que puede ser un motor.

La linealidad de este método está dada en que las matrices de admitancias de las tres secuencias son independientes del voltaje alterno del convertidor, por lo que se convierte en un proceso no iterativo. Para utilizar este método primero se resuelve el flujo de potencia a frecuencia fundamental, considerando los convertidores como cargas de potencia constante. Con los resultados del flujo se calculan los ángulos de disparo y las fuentes de voltaje DC de las cargas. Conocido esto se calculan los elementos de las matrices de admitancias mientras que al término $Y(0) \cdot E_{dc}$ se le conoce como fuentes de corriente. El resto de la red tiene un comportamiento lineal por lo que puede ser modelado como matriz de admitancias armónicamente desacopladas como indica la Ecuación (9).

$$\begin{bmatrix} [I_5] \\ [I_7] \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_5] & \dots & \dots \\ \dots & [Y_7] & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_5] \\ [V_7] \\ \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde $[I_h]$ es el vector de inyección de corriente en las barras y h es el orden armónico. Como las ecuaciones (8) y (9) son lineales pueden ser resultados de forma no iterativa [18].

vi. Método multifase

Consiste en formular el flujo de potencia en el dominio de las tres fases del sistema considerando también el neutro. En este enfoque, las cargas productoras de corrientes armónicas se representan por fase; y, para que se pueda realizar una evaluación monofásica de las cargas, tales como lámparas fluorescentes o electrodomésticos.

Las corrientes individuales son poco significativas, pero su efecto colectivo es muy sustancial. Una ventaja importante de este método es la capacidad de evaluar armónicos no característicos, los que se producen en condiciones de desequilibrio de fases del sistema, además de que con este método se puede representar el desplazamiento de fase de los armónicos en transformadores.

b. Métodos en el dominio del tiempo

i. Método convencional (Brute Force)

La solución en estado estacionario periódico de una red de potencia se puede obtener directamente en el dominio del tiempo mediante la integración de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. El procedimiento Brute Force puede requerir la integración durante períodos de tiempo considerables. Se ha sugerido solo para los casos en que la respuesta periódica sea suficientemente amortiguada. Aquellos *softwares* especializados en transitorios electromagnéticos pueden resolver la Ecuación de la red en el dominio del tiempo con una representación en espacio de estados mediante el uso del método de Runge-Kutta o de la Regla Trapezoidal [12].

ii. Rápida solución periódica en estado estacionario

Es un método basado en el método iterativo empleado para obtener la solución en estado estacionario sin necesidad de calcular el estado transitorio. La solución de la Ecuación (11) permite encontrar los vectores de las variables de estado x del sistema en el límite de un ciclo. La matriz I es la matriz identidad y Φ es la matriz de identificación o matriz de transición de estados, esta última se puede obtener mediante la Ecuación 12.

$$x^\infty = x^i + (I - \Phi)^{-1} (x^{i+1} - x^i) \quad (11)$$

$$\Phi = \partial x(t+T) / \partial x(t) \quad (12)$$

El cálculo de la matriz Φ puede efectuarse mediante varios métodos de simulación transitoria durante un período, resolviendo un conjunto de circuitos de sensibilidad, cuyas topologías son las mismas que las del sistema original que hay que resolver. Los métodos empleados para esta solución se citan a continuación y en [12] se encuentra su formulación matemática:

- Numerical Differentiation Method (ND)
- Direct Approach Method (DA)
- Enhanced Numerical Differentiation Method (END)
- Discrete Exponential Expansion Method (DEE)
- Sensitivity circuits

En el método cinco todos los circuitos por ser resueltos pueden ser descritos en términos de las Leyes de Kirchhoff (KCL y KVL) y ecuaciones constitutivas de ramificación (BCE). Tomando las derivadas parciales de estas ecuaciones

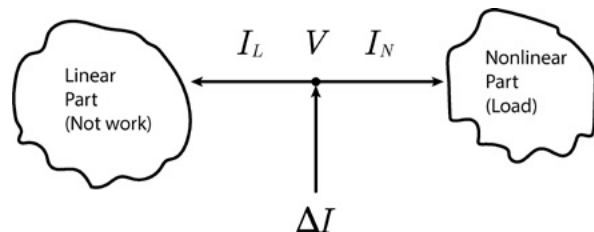
con respecto a las condiciones iniciales $x(0)$ se encuentran los circuitos de sensibilidad. Luego de obtener la resolución temporal del sistema, una transformada rápida de Fourier (FFT) o una transformada de Fourier discreta (DFT) debe aplicarse para obtener el contenido armónico de la solución periódica de estado estacionario.

c. Métodos híbridos

En [18] se hace referencia a las ventajas fundamentales de los métodos en el dominio del tiempo y la frecuencia y del motivo de que ambos forman la metodología híbrida. En donde los componentes de potencia se representan en sus características lineales y no lineales. La Fig. 1 ilustra la representación conceptual de la metodología híbrida. Los voltajes V en las barras de carga donde los componentes no lineales están conectados se obtienen de forma iterativa. A partir de los valores estimados de V , las corrientes de la parte lineal se calculan para cada armónico h utilizando la matriz de admitancia armónica (matriz para cada frecuencia), que incluye efectos de carga no lineales. Para la parte no lineal, V se toma en el dominio del tiempo como la función periódica por obtener, que se transforma entonces en el dominio de la frecuencia, el sistema queda sujeto entonces a la solución de la Ecuación (13).

$$\Delta I = [Y_k] \cdot \Delta V \quad (13)$$

Fig. 1. SISTEMA VISTO DESDE LAS BARRAS DE CARGA



Fuente: tomado de [18]

d. Transformada de Hartley

Para el propósito de calcular voltajes y corrientes no sinusoidales en presencia de elementos de electrónica de potencia, la transformada de Hartley se ha convertido en una herramienta computacional eficiente, ya que emplea valores reales a diferencia de la transformada de Fourier que emplea valores complejos y por lo tanto la convergencia de la solución desde el punto de vista de tiempo de simulación es más rápida manteniendo la misma precisión que la transformada de Fourier.

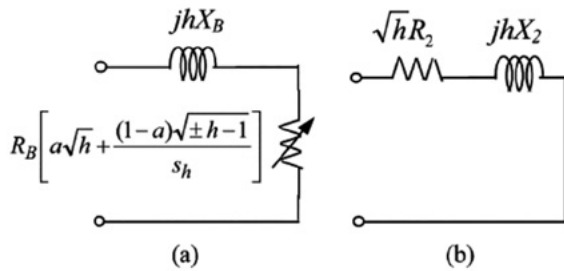
3. MODELOS DE LA RED

Los elementos del sistema de potencia para simulación de armónicos deben ser adecuados para representar las características y respuestas que cada uno de estos tiene ante la circulación de corrientes armónicas por la red.

a. Generadores sincrónicos

El modelo de máquinas sincrónicas de la Fig. 2 consiste en impedancias dependientes del orden armónico. En generadores sincrónicos se toman los parámetros de secuencia negativa, mientras que en el generador asincrónico se incluye la característica del deslizamiento.

Fig. 2. (a) MODELO DE MÁQUINA ASINCRÓNICA. (b) MODELO DE MÁQUINA SINCRÓNICA

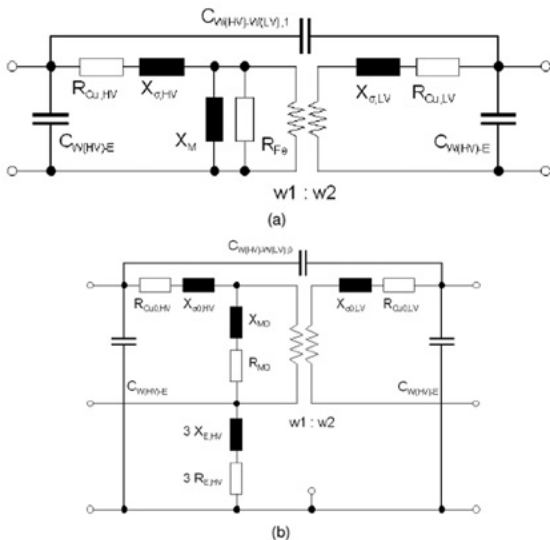


Fuente: Los autores

b. Transformadores

El modelo del transformador de la Fig. 3 consiste en su circuito de secuencia positiva y secuencia negativa, con parámetros dependientes de la frecuencia. Además, la modelación incluye a las capacitancias parásitas entre los devanados del transformador y tierra. Esta capacitancia tiene mayor relevancia ante frecuencias más elevadas.

Fig. 3. (a) MODELO DE SECUENCIA POSITIVA DEL TRANSFORMADOR. (b) MODELO DE SECUENCIA CERO DEL TRANSFORMADOR

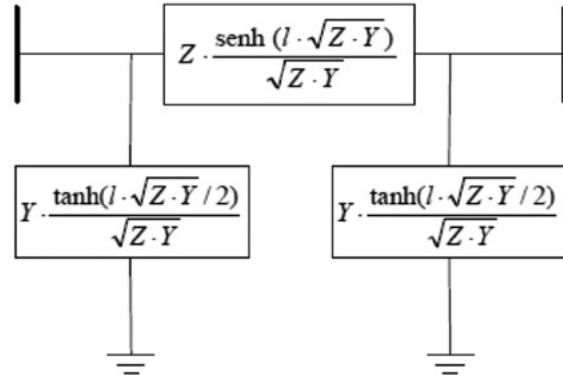


Fuente: Tomado de [19]

c. Líneas y cables

Las líneas de transmisión y los cables, tanto aéreos como subterráneos, se modelan mediante el equivalente PI de la Fig. 4 considerando parámetros distribuidos para todas las frecuencias de estudio.

Fig. 4. MODELO PI DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA (PARÁMETROS DISTRIBUIDOS)



Fuente: Tomado de [16]

d. Cargas

La modelación de cargas en un sistema de potencia, tiene una alta dificultad debido a su comportamiento ante variaciones de voltaje y frecuencia, y además de relativa imposibilidad de conocer la composición de la carga conectada. De [18] se toma la Tabla I, misma que presenta un resumen de los modelos de carga para simulación de armónicos que han sido desarrollados.

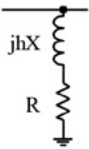
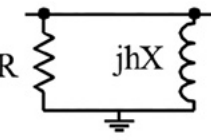
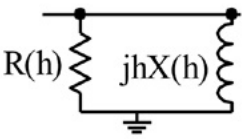
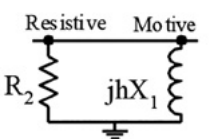
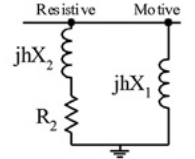
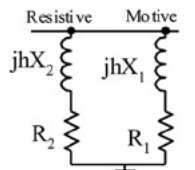
e. Fuentes de distorsión

La principal forma de modelar la introducción de efectos que alteran la forma de onda de voltaje o corriente en los sistemas eléctricos son las fuentes de corriente, donde para un determinado armónico le corresponde un porcentaje de corriente fundamental. Las fuentes de voltaje armónicas pueden ser también empleadas, pero no son un medio común de modelación. La Tabla II presenta los tres modelos más empleados por programas computacionales.

4. IEC 61000-3-6 E IEC 61400-21

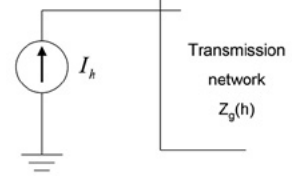
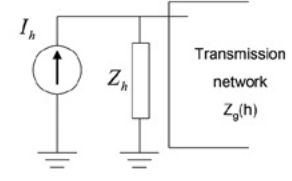
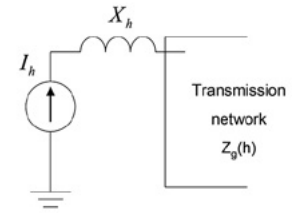
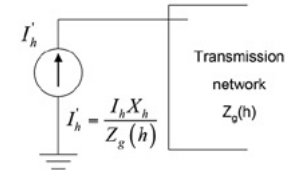
El estándar IEC 61000-3-6 se refiere a la evaluación de los límites de emisión de distorsión armónica en sistemas potencia de medio y alto voltaje; específicamente se presentan los máximos valores que cada armónico, tanto par, impar e impar múltiplo de tres, puede tener. Estas valoraciones son importantes tanto en la etapa de operación (compatibilidad) y en la etapa de planeamiento del sistema eléctrico.

Tabla I.
MODELOS DE CARGA PARA SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA

Modelo	Parámetros
<p>Modelo 1. Serie</p> 	$R = P \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$ $X = Q \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$
<p>Modelo 2. Paralelo</p> 	$R = \frac{V^2}{P}$ $X = \frac{V^2}{Q}$
<p>Modelo 3. Efecto piel</p> 	$R(h) = \frac{V^2}{M(h) \cdot P}$ $X(h) = \frac{V^2}{m(h) \cdot Q}$ $m(h) = 0.1 \cdot h + 0.9$
<p>Modelo 4. Motor de inducción más resistencia</p> 	$R_2 = \frac{V^2}{(1 - K) \cdot P}$ $X_1 = \frac{V^2}{K_m K_1 K \cdot P}$ <p>K_m es el factor de instalación (≈ 1.2) K_1 es el factor de severidad (≈ 8), y K es la fracción de carga del motor.</p>
<p>Modelo 5. CIGRE/EDF</p> 	$R_2 = V^2 / (1 - K) \cdot P$ $X_2 = 0.073 \cdot R_2$ $X_1 = \frac{V^2}{K \cdot P \cdot (6.7 \cdot \tan\phi - 0.74) \tan\phi} = Q/P$
<p>Modelo 6. Inclusión de un transformador de carga y amortiguamiento en el motor.</p> 	<p>X_1 y R_2 como en el Modelo 4.</p> $X_2 = 0.1 \cdot R_2$ $R_1 = X_1 / K_3$ <p>K_3 es el factor de calidad del circuito del motor (≈ 8 para grandes motores).</p>

Fuente: Tomado de [18]

Tabla II.
MODELOS DE FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Tipo	Datos	Modelo
Fuente ideal de corriente	Corrientes armónicas medidas o estimadas (I_h)	
Fuente no ideal de corriente	Corrientes armónicas (I_h) Impedancia en paralelo (Z_h)	
Fuente de voltaje o reinyección de corriente	Corrientes armónicas (I_h) Reactancia inductiva (X_h)	
		

Fuente: Tomado de [18]

La Tabla III presenta los límites de compatibilidad de voltajes armónicos en sistemas de bajo y medio voltaje, mientras que la Tabla IV muestra los límites de planeamiento en sistemas de medio, alto y extra alto voltaje. Estas limitaciones pueden variar entre un país y otro, debido a que cada sistema tiene la potestad de establecer los requerimientos y restricciones técnicas que estime convenientes para evitar una alta presencia de contenido armónico.

Donde el cálculo del THD se realiza según las indicaciones expuestas en [19]. El estándar IEC 61400-21 "Medida y evaluación de las características de la calidad de suministro de las turbinas eólicas conectadas a la red" proporciona una metodología para determinar el impacto de la generación eólica en la calidad de energía en el punto de conexión a la red eléctrica, siendo un principal objetivo establecer un procedimiento de medición de armónicos cuyo reporte es requerido por la mayoría de *software* comerciales que dentro de sus módulos pueden calcular emisión de armónicos [20]. La Tabla V presenta una parte de un reporte de ensayos realizado con esta normativa.

Tabla III.
LÍMITES DE COMPATIBILIDAD ARMÓNICA DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE LV Y MV

Odd harmonics non multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3		Even harmonics	
Order h	Harmonic voltage %	Order h	Harmonic voltage %	Order h	Harmonic voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3-(25/h)				

NOTE: Total harmonic distortion (THD): 8%

Fuente: Tomado de [20]

Tabla IV.
LÍMITES DE PLANEAMIENTO DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE MV, AV Y EAV

Odd harmonics non multiple of 3			Odd harmonics multiple of 3			Even harmonics		
Order h	Harmonic voltage %		Order h	Harmonic voltage %		Order h	Harmonic voltage %	
	MV	HV-EHCV		MV	HV-EHCV		MV	HV-EHCV
5	5	2	3	4	2	2	1.6	1.5
7	4	2	9	1.2	1	4	1	1
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
>25	0.2+0.5-(25/h)	0.2+0.5-(25/h)						

NOTE: Total harmonic distortion (THD): 6.5% in MV networks, 3% in HV networks

Fuente: Tomado de [20]

Tabla V.
EMISIÓN DE ARMÓNICOS DE UNA TURBINA EÓLICA DE 2.3MW

Order	Output power [kW]	Harmonic current [% from In]	Order	Output power [kW]	Harmonic current [% from In]
2	73	0.4	13	988.2	0.2
3	1308.9	0.4	23	1867.3	0.2
4	135.1	0.3	25	2318.3	0.2
5	2134.1	2.3	45	618.7	0.2
6	425	0.2	47	214	0.5
7	42.8	1.0			
8	2189.1	0.1			
11	1588.4	0.4			

Fuente: Tomado de [21]

5. SOFTWARE

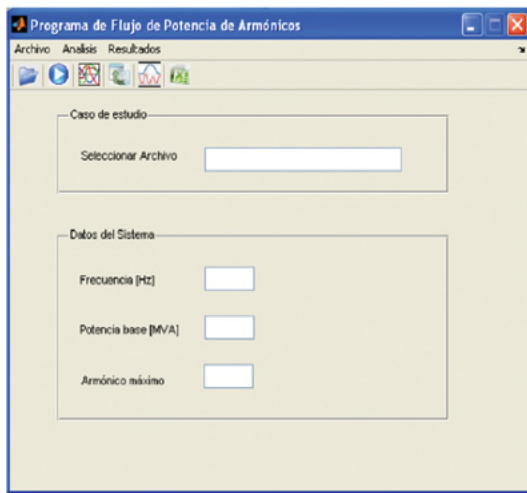
Comercialmente y en la actualidad existen muchos paquetes computacionales que pueden calcular armónicos en cualquier sistema eléctrico de potencia. En la información de ayuda de cada *software* se pueden encontrar especificaciones sobre el método de cálculo y sobre cómo son modelados los diversos componentes de la red. En la Tabla VI se presenta un listado de *software* comerciales con la funcionalidad del cálculo de armónicos.

Tabla VI.
SOFTWARE COMERCIALES PARA CÁLCULO DE ARMÓNICOS

Software	Empresa desarrolladora
PowerFactory	DigSILENT GmbH
PSCAD	Manitoba
ETAP	Operation Technology Inc
SuperHarm	Electrotek

Además de un *software* comercial, es posible programar un método de cálculo de armónicos, sea en el dominio de la frecuencia o tiempo en un escrito que puede ejecutarse en programas como Matlab o programas de código abierto como *Scilab*.

Fig. 5. PROGRAMA PARA CÁLCULO DE ARMÓNICOS DESARROLLADO EN MATLAB



Fuente: Tomado de [16]

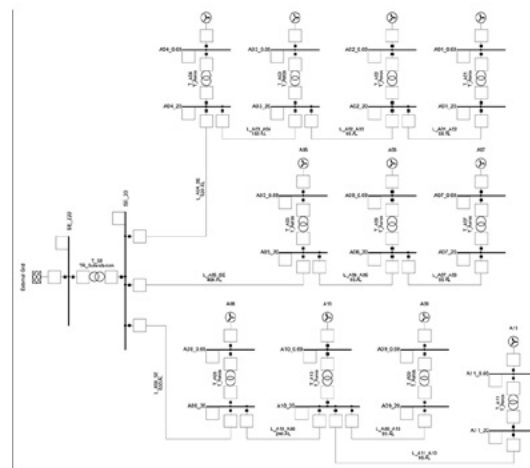
6. CASO DE ESTUDIO

La realización de un estudio de armónicos debe iniciar con la modelación del sistema eléctrico con todos sus elementos (generadores, motores, transformadores, líneas, cables, cargas, inductores, capacitores) los cuales en cada *software* tienen una representación [21]. La Fig. 6 presenta la modelación de un sistema eléctrico de prueba en PowerFactory, el cual tiene 11 aerogeneradores de 2.3MW.

La modelación de la emisión de armónicos de los aerogeneradores se realiza mediante una fuente de corriente y con los datos de la Fig. 7.

El resultado de la simulación se presenta en la Fig. 8 (voltajes armónicos en el punto de conexión), el cual debe ser contrastado con los límites de emisión que se presentan en la normativa aplicable. Una manera efectiva también de analizar el comportamiento de los armónicos que circulan por un sistema de potencia es el barrido en frecuencia de la impedancia Thevenin en un punto que permite identificar posibles problemas de resonancia que amplifiquen el efecto armónico. La Fig. 9 presenta el barrido en frecuencia de la impedancia en el punto de conexión, donde se identifica una resonancia paralela alrededor de 950 Hz.

Fig. 6. SISTEMA DE POTENCIA DE PRUEBA EN POWERFACTORY



Fuente: Los autores.

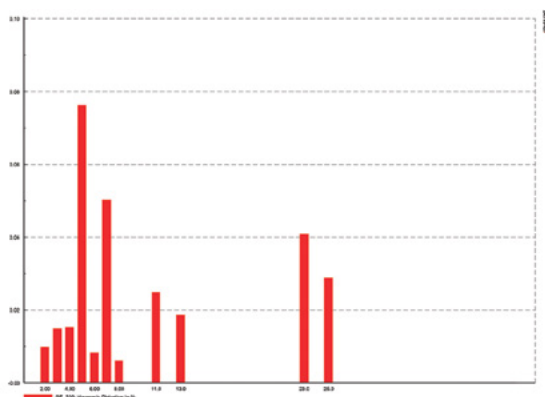
Fig. 7. MODELACIÓN DE LA EMISIÓN DE ARMÓNICOS DE LA TURBINA EÓLICA

Integer Harmonics:

	I_{h1} %
$f/f_n=2$	0.4
$f/f_n=3$	0.4
$f/f_n=4$	0.3
$f/f_n=5$	2.3
$f/f_n=6$	0.2
$f/f_n=7$	1.
$f/f_n=8$	0.1
$f/f_n=9$	0.
$f/f_n=10$	0.
$f/f_n=11$	0.4
$f/f_n=12$	0.
$f/f_n=13$	0.2
$f/f_n=14$	0.

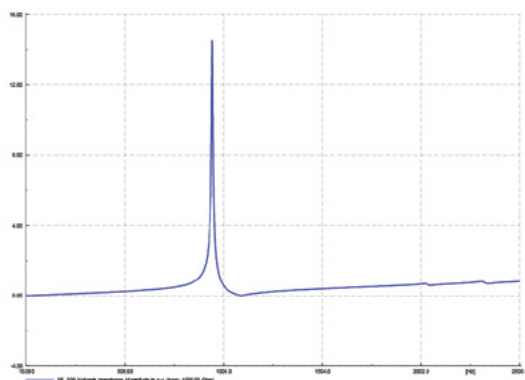
Fuente: Los autores.

Fig. 8. ESPECTRO ARMÓNICO EN EL PUNTO DE CONEXIÓN



Fuente: Los autores.

Fig. 9. IMPEDANCIA THEVENIN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA EN EL PUNTO DE CONEXIÓN



Fuente: Los autores.

7. CONCLUSIONES

La simulación de armónicos en sistemas de potencia puede realizarse mediante diversos métodos y dependerá de la selección de uno de estos la aplicación o la sensibilidad de los resultados que deseen obtenerse.

Los métodos de simulación en el dominio de la frecuencia tienen una relativa mayor facilidad de implementación que los métodos en el dominio del tiempo, porque en el dominio de la frecuencia las ecuaciones del sistema eléctrico por resolver no tienen una forma integro-diferencial que requiere avanzados métodos numéricos para encontrar su solución.

El método multifase puede ser explorado en temas de investigación que se enfoquen en la calidad de energía en sistemas de distribución donde existan zonas industriales, porque permite caracterizar de mejor manera los armónicos en cada fase del sistema eléctrico.

Los modelos de carga para simulación de armónicos son aquellos que tienen más complejidad en implementarse debido a que modelar los efectos de los armónicos en cargas de composición estática-dinámica requiere el empleo de técnicas estadísticas y probabilísticas a causa del comportamiento estocástico de la carga.

REFERENCIAS

- [1] Z. Klaić, G. Knežević, M. Primorac, and D. Topić, "Impact of photovoltaic and biogas power plant on harmonics in distribution network," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 1, pp. 110-117, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0528.
- [2] A. Valenzuela, I. Montalvo, and C. Barrera-singaña, "Electrical Vehicle: Facing Future Challenges in Quito," 2017, doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126694.
- [3] A. Valenzuela, C. Barrera, and E. Inga, "Electrical assessment of georeferenced distribution network due to electric vehicles deployment Evaluación de un sistema eléctrico georreferenciado de distribución debido a la penetración de vehículos eléctricos," *Rev. I+D tecnológico*, vol. 16, no. 1, 2020.
- [4] J. M. Soni and M. H. Pandya, "Power Quality Enhancement for PV rooftop and BESS in Islanded mode," *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2018*, pp. 242-247, 2018, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442370.
- [5] C. A. Caldeira, A. D. D. De Almeida, H. R. Schlickmann, C. S. Gehrke, and F. Salvadori, "Impact analysis of the BESS insertion in electric grid using real-time simulation," *2019 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Lat. Am. 2019*, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895464.
- [6] C. Burgos-Mellado et al., "Distributed Control Strategy Based on a Consensus Algorithm and on the Conservative Power Theory for Imbalance and Harmonic Sharing in 4-Wire Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1-1, 2019, doi: 10.1109/tsg.2019.2941117.
- [7] F. Nejabatkhah, Y. W. Li, and H. Tian, "Power quality control of smart hybrid AC/DC microgrids: An overview," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, pp. 52295-52318, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912376.
- [8] S. Li et al., "Effect of AC-voltage harmonics on oil impregnated paper in transformer bushings," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 1, pp. 26-32, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008247.
- [9] S. B. Subramanian, R. K. Varma, and T. Vanderheide, "Impact of Grid Voltage Feed-Forward Filters on Coupling between DC-Link Voltage and AC Voltage Controllers in Smart PV Solar Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 381-390, 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2891571.
- [10] T. L. G. Soh, D. M. Said, N. Ahmad, K. M. Nor, and F. Salim, "Experimental study on the impact of harmonics on transformer," *Proc. 2013 IEEE 7th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2013*, no. June, pp. 686-690, 2013, doi: 10.1109/PEOCO.2013.6564634.
- [11] J. Kaiwart and U. Bala, "Techniques for Power Quality Improvement by Mitigation of Harmonics," *Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput.*, no. 1, pp. 1532-1536, 2017.

- [12] A. Medina et al., "Harmonic analysis in frequency and time domain," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1813-1821, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2258688.
- [13] IEEE Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power systems Part II: Sample systems and examples," 1996.
- [14] W. Su, Z. Li, and Z. Shao, "The harmonic calculation model of non-linear load," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CIED*, vol. 2014-Decem, no. Ciced, pp. 866-872, 2014, doi: 10.1109/CIED.2014.6991832.
- [15] J. E. Caicedo, A. A. Romero, and H. C. Zini, "Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction," *2017 3rd IEEE Work. Power Electron. Power Qual. Appl. PEPQA 2017 - Proc.*, pp. 1-6, 2017, doi: 10.1109/PEPQA.2017.7981641.
- [16] G. Constante, "Flujo de potencia de armónicos utilizando Matlab," Quito : EPN, 2014., Sep. 2014.
- [17] J. Arrillaga, A. Medina, M. L. V. Lisboa, P. Sánchez, and M. A. Cavia, "The harmonic domain. a frame of reference for power system harmonic analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 433-440, 1995, doi: 10.1109/59.373968.
- [18] A. Semlyen and A. Medina, "Computation of the periodic steady state in systems with nonlinear components using a hybrid time and frequency domain methodology," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1498-1504, 1995, doi: 10.1109/59.466497.
- [19] IEC, "IEC, 61000-3-6 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication." 1996.
- [20] IEC, "IEC, 61400-21 Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines." 2008.
- [21] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Harmonic analysis in a power system with wind generation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 4, pp. 2006-2016, Oct. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.864063.