



## APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJES EN SISTEMAS Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS: SU IMPORTANCIA Y TRABAJOS RELACIONADOS

(Application of artificial intelligence tools in harmonic current and voltage systems and electrical machines: its importance and related work)

Recibido: 23/04/2014 Aceptado: 26/09/2014

**Gil, César**

Universidad de la Costa, Colombia

[CesarGil2012@gmail.com](mailto:CesarGil2012@gmail.com)

### RESUMEN

La presencia de armónicos de corrientes y voltajes acompañados de otras perturbaciones como swell, sags y flicker (entre otros) en sistemas eléctricos es común en la mayoría de las instalaciones que están conformada por cargas no lineales, lo que produce diversos problemas de índole técnico y económicos, fundamentados en las pérdidas por calentamientos excesivos por encima de los valores de referencias. Estas razones conducen a la permanente búsqueda de soluciones a los efectos nocivos de dichas perturbaciones, destacándose entre otras, el diseño de filtros pasivos y activos o compensadores para diferentes frecuencias. Simultáneamente, con estos aportes, la inteligencia artificial constituye una herramienta de gran importancia por las características no lineales que permiten el estudio e identificación de este tipo de sistemas. A partir de estas consideraciones, este documento presenta los resultados preliminares obtenidos en la primera fase del proyecto de estudio de viabilidad de aplicación de inteligencia artificial en armónicos de corriente y voltaje en sistemas eléctricos, dando como resultado inicial un análisis de eficiencia de la aplicación de lógica difusa, redes neuronales y la combinación con otros procedimientos convencionales, contribuyendo así a la conformación de herramientas de monitoreo, supervisión y análisis aplicables a las máquinas y sistemas eléctricos.

**Palabras clave:** filtros armónicos, redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa.

### ABSTRACT

The presence of harmonic currents and voltages accompanied by other disturbances as swell, sags and flicker (among others) in power systems is common in most of the installation with non-linear loads, resulting in many problems of a technical nature and economic, based on excessive heating losses above the reference values. These reasons lead to the ongoing search for solutions to the harmful effects of such disturbances, standing out among others, the design of passive and active or compensating filters for different frequencies. Simultaneously with these contributions, artificial intelligence is an important tool for the nonlinear characteristics that allow the study and identification of such systems. From these considerations, this paper presents the preliminary results of the first phase of the project feasibility study artificial intelligence application in current and



voltage harmonics in electrical systems, giving as initial result an efficiency analysis of the implementation of fuzzy logic, neural networks and the combination with other conventional methods, thus contributing to the creation of monitoring tools, supervision and applicable to machinery and electrical systems analysis.

**Keywords:** harmonic filters, neural networks, genetic algorithms, fuzzy logic.

## INTRODUCCIÓN

Las instalaciones eléctricas son diseñadas para operar de acuerdo con capacidades nominales de potencia, corrientes, voltajes, frecuencias y demás parámetros de funcionamiento dados por los fabricantes de máquinas y equipos, en respuesta a los diferentes procesos que responden a necesidades puntuales.

En este orden de ideas, si estas variables sufren cambios significativos e influyentes como consecuencias de dispositivos no lineales, como por ejemplo, la eficiencia de los circuitos se reducirá notablemente repercutiendo, también, en el disparo inadecuado de protecciones, calentamientos excesivos, sobrecorrientes y demás acciones propias de los armónicos y fenómenos transitorios.

Los sistemas eléctricos, al entrar en operación, presentan diferentes estados de funcionamiento que son importantes analizarlos, teniendo en cuenta sus principales implicaciones técnicas y de impacto económico que, en última instancia, influyen en diversas áreas de las instalaciones incluyendo la productiva.

Por estas razones, entre otras, analizar las diferentes variaciones o fluctuaciones de las variables más importantes (como corriente, voltaje, potencia y energía) es indispensable para realizar una correcta y completa caracterización.

Sin embargo, los dispositivos y herramientas de medición modernas no permiten obtener todas las respuestas y control sobre los fenómenos que se presentan, razón por la cual es necesario desarrollar otros procedimientos que arrojen resultados confiables, eficaces y aplicables en un amplio rango de sistemas y procesos.

En virtud de lo anterior, surgen diversas técnicas no convencionales como la inteligencia artificial para identificar variaciones de patrones con altas desviaciones, reconocer corrientes de fallas, corrientes de cortocircuitos, voltajes distorsionados y demás acciones que conforman procedimientos, logrando con ellos la identificación y predicción en la ocurrencia de eventos, con estudios de simulación incorporando software de última generación. Lo anterior conlleva a la existencia de diferentes enfoques y criterios de análisis, teniendo como objetivo común la identificación del estado de los circuitos o sistemas que se analizan.

Por tanto, los objetivos de este documento se centran en estudiar y analizar la importancia de la aplicación de herramientas de inteligencia artificial en armónicos de corriente y voltajes en sistemas y máquinas eléctricas como base para el inicio de proyectos de mayor escala que implican la medición de dichos eventos en diferentes



sistemas eléctricos, con el posterior tratamiento de las señales para identificar eventos o perturbaciones que produzcan cambios en el comportamiento de los mismos.

Para ello, se procede a realizar un estudio de lo general a lo específico, es decir, se plantea el inicio de actividades relacionadas con la vigilancia tecnológica, entendida esta como un conjunto de actividades encaminadas a la exploración o búsqueda de soluciones a problemas que ocurren en cualquier ámbito de desarrollo y en los proyectos de investigación e innovación, con el fin de conocer y disponer de las herramientas actuales que puedan ser utilizadas para el alcance de objetivos e implantación de soluciones. (Maspons y Escorsa, s/f).

Solamente cuando estas soluciones, después de realizar la búsqueda, no se encuentran disponibles, se hace necesario proceder a la investigación propiamente dicha para intentar resolver estos problemas, lo cual requiere el cumplimiento de una serie de requisitos o condiciones que se deben conocer, como por ejemplo: las tecnologías que se investigan, las soluciones tecnológicas disponibles, las tecnologías emergentes que están surgiendo, la dinámica de las tecnologías (aquellas que son actualizadas y obsoletas), las líneas de investigación y las trayectorias tecnológicas de las principales empresas que compiten en el área, los centros de investigación, equipos y personas líderes en la generación de nuevas tecnologías capaces de transferir tecnología. (Maspons y Escorsa, s/f).

Como resultados obtenidos se destacan: la identificación de trabajos efectuados por autores reconocidos, al igual que el conocimiento de herramientas computacionales inteligentes y convencionales, aplicadas al análisis de la ocurrencia de eventos en sistemas eléctricos, que permiten determinar cuáles serían las siguientes etapas en la estructuración metodológica conducente a desarrollar nuevas herramientas o, en su defecto, al mejoramiento de las mismas que permitan nuevas aplicaciones tendientes a la mejor explotación de las características distintivas de los armónicos de corriente y voltaje en sistemas y máquinas eléctricas.

## ARMÓNICOS

Los armónicos de corriente y voltaje son ondas de corriente y voltaje que coexisten simultáneamente con la onda de voltaje y corriente, cuyas frecuencias son múltiplos de la componente fundamental. (Legrand, s/f; Barraza, 2010).

Los armónicos se encuentran principalmente en las ondas de tensión entregada por el operador de red a la estructura general del sistema de potencia del cual hacen parte las instalaciones y máquinas que se usan en la transformación de materias primas o de uso final.

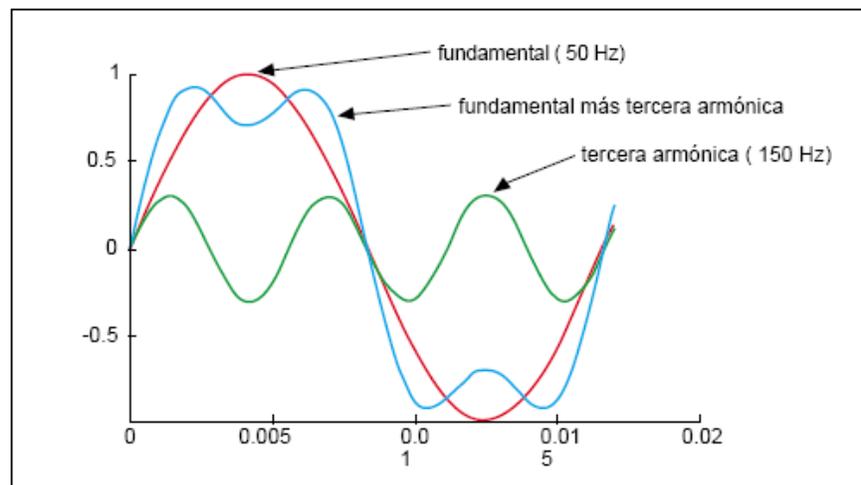
De acuerdo con esto, al existir señales u ondas de voltajes conformadas por la sumatoria fasorial de componentes superiores a la frecuencia para la cual fue diseñado el sistema, se presentan problemas con los valores de reactancias inductivas y capacitivas que, al ser analizadas, pueden coexistir en mayor o menor proporción, acorde con los métodos establecidos en la minimización de los impactos de los armónicos.

Estos valores de reactancias afectan las corrientes y voltajes ocasionando distorsiones de las ondas de dichas variables que afectan los parámetros esenciales de las mismas, entre los que se destacan:

- Valores máximos e instantáneos.
- Cruces por cero.
- Verdadero factor de potencia.
- Cambios en la excursión de la onda de subida y bajada.
- Saltos imprevistos de voltajes.
- Interrupciones temporales.
- Distorsión de la forma de onda de voltaje y corriente.

En la Figura 1 se ilustra la conformación de una onda a partir de la sumatoria de las componentes del tercer armónico. Es decir, la onda no es regular y presenta lóbulos adicionales que cambian la forma de onda y los valores máximos, factor de potencia y frecuencia neta, de tal forma que las cargas que son alimentadas con este voltaje reciben la conformación de una onda no senoidal pura sino distorsionada y con una magnitud mucho mayor que la onda seno fundamental.

**Figura 1. Esquema general de los de una onda de voltaje perturbada por los armónicos en una instalación eléctrica**



**Fuente:** Noriega (2005).

En la actualidad, la presencia de armónicos de corriente y voltaje son comunes en aplicaciones de toda índole, encontrándose principalmente en instalaciones comerciales e industriales, debido a que en ellas predominan máquinas y equipos eléctricos,



electrónicos y electro-mecánicos, como por ejemplo motores de inducción, UPS, lámparas con encendido electrónico, fuentes de suicheo, variadores de frecuencia, computadores, balastos electrónicos, entre otros.

De aquí surge la importancia de una carga no lineal, la cual es considerada como aquella cuya impedancia cambia al aplicar voltaje y responde a una relación no establecida linealmente por la Ley de Ohm en un amplio rango de respuesta proporcional a los cambios de voltajes o corrientes.

### **ESTÁNDARES INTERNACIONALES SOBRE ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE**

La mayoría de los sistemas de potencia presentan ciertos valores o niveles de armónicas hasta cierto porcentaje cuando son referidas a las cargas y son éstas la que inyectan los armónicos y distorsiones al sistema (IEEE, 1992).

A raíz de este tipo de problema, desde hace muchos años, investigadores internacionales han realizado estudios tendientes a encontrar soluciones que contrarresten el efecto de los armónicos siendo una de las más importantes el análisis de Fourier, que permite establecer las componentes de frecuencias múltiplos de la fundamental con sus respectivas magnitudes. De tal forma que es posible expresar matemáticamente la ecuación general de una función seno o coseno como la sumatoria de varias ondas con sus respectivas frecuencia y, a partir de aquí, determinar las consecuencias sobre las impedancias, reactancias y demás aspectos de los circuitos e instalaciones eléctricas conformados por cargas no lineales, y a su vez con alimentación con alto contenido de armónico (Hoevenaars y col., 2003).

Como referencia general, existen máquinas y circuitos distribuidores que inyectan armónicos de corriente al igual que la reciben en sus terminales tiene una componente de frecuencia fundamental más las armónicas impares: 5, 7, 11, 13 y demás.

Éstos son estándares de diferentes países que por muchos años han establecido un conjunto de referencias que se utilizan actualmente para realizar las comparaciones de las magnitudes de armónicos de voltaje y corriente a las frecuencias múltiples de la fundamental, con el fin de disponer de patrones definidos para diferentes sistemas y configuraciones de circuitos e instalaciones de maquinaria, teniendo en cuenta el funcionamiento de las mismas y, en algunos casos, los posibles orígenes de las señales distorsionadas con armónicos. Entre ellas se destacan:

1. El estándar IEEE 1159-1995: define el concepto de calidad de energía eléctrica como un conjunto de fenómenos electromagnéticos que permiten identificar la conformación completa de la corriente y tensión en un instante dado y en un punto de referencia, a partir de la medición con instrumentos de verdaderos valores RMS y analizadores de red eléctrica en un punto estratégico, de acuerdo con perturbaciones y operaciones inadecuadas de las máquinas conectas al sistema de estudio.



2. El estándar IEC 61000-4-30: establece la calidad de la potencia evaluada en un punto de la red teniendo en cuenta los parámetros de la corriente y voltaje medido con un instrumento especializado en ese punto de referencia y teniendo en cuenta como referencias otros parámetros que sirven como patrones de comparación.

A partir de estas definiciones y estipulaciones surge un tema importante como lo es la calidad del suministro de energía eléctrica en puntos determinados como referencia de medición, definiéndola como la suma de la disponibilidad del suministro de energía eléctrica en ese punto con la calidad de la tensión y de la corriente entregada. De esta forma, la falta de calidad es definida como la desviación de las magnitudes y formas de onda de corriente y voltaje de su forma sinodal (a la frecuencia fundamental) originando consigo que cualquier desviación sea considerada como una perturbación o “pérdida de la calidad”.

### **LA DEMANDA DE ENERGÍA Y LOS ARMONICOS DE CORRIENTE Y DE VOLTAJE**

Una característica importante de los sistemas eléctricos con sus respectivas aplicaciones es la demanda de energía acorde con el consumo de las máquinas y dispositivos de las instalaciones por parte de los usuarios, que modifican permanentemente las impedancias equivalentes efectivas y que originan diferentes niveles de corrientes, que en muchas ocasiones no son proporcionales a la demanda y no cumplen estrictamente con la Ley de Ohm.

Al circular dichas corrientes por los intrincados caminos de conductores de alimentadores producen caídas de tensión que en muchas ocasiones superan las estimadas precisamente por el comportamiento no lineal. La adición de las caídas de voltaje desde los puntos más cercanos a los puntos de conexión de las cargas más alejadas genera sobre todo disminución en los voltajes, lo que puede afectar negativamente el funcionamiento de máquinas y dispositivos conectados en esos puntos del sistema.

Los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos sensibles fabricados con tecnología digital de última generación, como por ejemplo los PLC, tarjetas de control, sensores, variadores de velocidad, computadores, luminarias y elementos operativos de electrónica de alto consumo, entre otros, alteran drásticamente su funcionamiento y operación en presencia de armónicos de corriente y voltaje y de otros fenómenos relacionados.

La pérdida de segundos o milésimas de segundo por la presencia de un sag o una sobretensión adicional trae consigo, en muchas circunstancias, el reset de dichos equipos, lo que puede repercutir en el control de esa máquina en el proceso de operación productivo mediante el frenados de motores, cambios de velocidades, cambios de sentido de giros o impactos en las eficiencias energéticas, contribuyendo con efectos económicos negativos en la industria y, en general, en aquellas instalaciones conformadas por elementos electro intensivos. Los fenómenos asociados con los armónicos de corriente y de voltaje más importantes por sus impactos y acciones se describen a continuación:



## FENÓMENOS ASOCIADOS A LOS ARMONICOS DE CORRIENTES Y DE VOLTAJES

**Sags:** Los sags son disminuciones súbitas e impredecibles del valor eficaz del voltaje por debajo del 90% y por encima del 10% de la tensión utilizada como referencia en periodos de tiempos continuos, asumiendo cierta tendencia en el tiempo a permanecer sin variaciones significativas, acompañados por un retorno a un valor más alto que el 90 % de la tensión de referencia en un tiempo que varía desde los 8,33 milisegundos hasta un (1) minuto (Hoevenaars y col., 2003).

Los sags son causados normalmente por corrientes elevadas provenientes de cortocircuitos o conexión u operación de cargas eléctricas no lineales o lineales que exigen una elevada demanda de potencia y periodos de arranque y aceleración con tiempos y pares impulsados significativos.

Los sags son impredecibles y de comportamiento aleatorio, hasta el punto de presentar las siguientes características:

- Pueden ser producidos por fallas en la fuente de alimentación del sistema de potencia por sobretensiones en periodos sucesivos con tendencia a la disminución repentina de volver de nuevo al estado inicial.
- Arranque de motores con elevaciones de corrientes, por encima de las corrientes nominales con alto par de arranque y aceleración.
- Cortocircuitos producidos en los sistemas de alimentación, originados por fenómenos naturales no asociados a la operación ni descargas atmosféricas.

**Variaciones de tensión de estado estable:** las variaciones de tensión en estado estable son desviaciones de larga duración (por periodos de tiempos considerables) del valor eficaz de la tensión de alimentación a la frecuencia de la red de alimentación. Dependen de las características de diseño del sistema, variaciones de operación de las cargas eléctricas y otras propias del sistema en función de la probabilidad de ocurrencia de un evento.

Los intercambiadores automáticos y manuales de taps en los transformadores de las subestaciones del operador de red o de los usuarios son soluciones comunes a este tipo de perturbaciones que puede producir retardos de operación o apagados repentinos de las máquinas en operación.

**Swells:** son aumentos impredecibles del valor eficaz de la tensión por encima del 110 % de la tensión definida como referencia. Las sobretensiones temporales pueden durar entre 8.33 milisegundos y 1 minuto, lo que puede producir serias alteraciones con los niveles de aislamiento y disparos inadecuados de las protecciones por efecto de elevados niveles de diferencia de potencial. Son caracterizados por la duración por encima de un umbral definido y por la magnitud de la elevación.



Subtensiones y sobretensiones: son variaciones de tensión de larga duración mayores que 1 minuto, dependiendo si este valor eficaz está por encima o por debajo del  $\pm 10\%$  de la tensión de alimentación de referencia respectivamente.

Desbalance de tensión: este índice caracteriza la magnitud y asimetrías del ángulo de fase de las tensiones trifásicas en operación de estado estable. El factor de desbalance de tensión es definido bajo la teoría de componentes simétricas como la relación entre la componente de secuencia negativa de la tensión y la componente de secuencia positiva.

Flicker: se puede definir comparándolo con las perturbaciones emitidas por el parpadeo de una fuente lumínica, como el efecto producido sobre la percepción visual humana por una emisión cambiante de luz debido a iluminación sujeta a fluctuaciones en la tensión de suministro en baja tensión. Las fluctuaciones de tensión se manifiestan por medio de una secuenciación de rápidos cambios de tensión espaciadas lo bastante cerca en el tiempo para simular la respuesta del cerebro definida como flicker.

### **INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN EL SISTEMA**

Repercusiones de la distorsión armónica en motores: cuando los motores eléctricos son excitados por voltajes con alta distorsión armónica se comienzan a inyectar frecuencias más altas en el estator, creando a su vez corrientes de armónicas en los devanados, lo que consecuentemente puede llevar a incrementos de temperaturas, vibraciones mecánicas y demás aspectos relacionados, a saber:

- Las corrientes de alta frecuencia de armónicos producen temperaturas de operación de mayor nivel en los devanados debido a pérdidas de corrientes de Eddy, razón por la cual los motores se sobrecalentarán aunque no estén trabajando a su plena carga.
- Los voltajes con altos contenidos de armónicos producen exceso de vibración tanto en motores de inducción trifásicos como en los motores de inducción monofásico, ocasionando con ello un mayor uso y desgaste de los mecanismos de giro y pivote de dichas máquinas, influyendo en última instancia en la eficiencia y confiabilidad de funcionamiento del eje del motor.
- Los variadores y controladores de velocidad son dispositivos electrónicos altamente sensibles y susceptibles a las perturbaciones relacionadas con la calidad de la energía y crean distorsiones de corriente que son inyectados al sistema de alimentación y pueden reflejarse en otros dispositivos y máquinas que hacen parte del proceso.

Repercusiones de la distorsión armónica en alumbrado: de acuerdo con el tipo de sistema, el alumbrado puede ser afectado por la distorsión armónica ya sea por zonas o todo el sistema eléctrico al que se conectan las lámparas (Contreras, 2006).

Los sistemas de alumbrado fluorescentes de baja o alta intensidad de descarga crean distorsión en la corriente: los sistemas fluorescentes estándares y de HID (High Intensity Discharge) crean cerca del 15 % al 20 % de la distorsión armónica total (THD). Los



balastos electrónicos pueden crear menos del 10 % hasta más del 40 % de THD, dependiendo del diseño.

Sin embargo, la presencia de distorsión de corriente no necesariamente contribuye al surgimiento de problemas, ya que estos son catalogados como peligrosos cuando la distorsión de corriente tiene un efecto indeseable sobre el equipo produciendo impactos de alto nivel en el consumo energético.

De igual forma, la presencia de corrientes armónicas en el neutro puede crear una distorsión de corriente significativa produciendo un sobre voltaje que puede destruir fácilmente los sistemas de iluminación, afectando indirectamente a los sistemas o circuitos anexos o complementario.

### **REPERCUSIONES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN OTROS DISPOSITIVOS**

Los bancos de capacitores son afectados por los picos de la forma de onda. En general la distorsión armónica de tensión debería ser limitada al 5%.

Las corrientes armónicas causan aumento de pérdidas en líneas y transformadores y pueden causar respuestas incorrectas de relevadores y dispositivos de protección.

Disparo de interruptores y fusibles: se pueden presentar fenómenos de resonancia en los que los niveles de corriente pueden incrementarse provocando el disparo de interruptores y quema de fusibles.

Sobrecarga de Transformadores: los transformadores son diseñados para transferir energía con la frecuencia de red (50/60Hz). Con frecuencias mayores de los armónicos las pérdidas aumentan, causando un calentamiento adicional al transformador.

Pérdidas en equipos de distribución: las armónicas agregadas a la fundamental causan pérdidas adicionales en los cables, fusibles y barras de distribución.

Aumentos excesivos de corriente de Neutro: en condiciones de carga balanceada sin armónicas las corrientes de línea se cancelan en el neutro. Sin embargo, en un sistema de 4 hilos con cargas monofásicas no lineales, los múltiplos impares de la 3° armónica (3°, 9°, 15°) no se cancelan sino que se adicionan en el conductor de neutro

Al realizar una análisis más especializado, y según el estándar IEEE 519 de 1992, se puede establecer a partir de la Tabla 1 y Tabla 2 que existen indicadores que permiten definir valores máximos de presencia de armónicos en ondas de voltaje de tal forma que sean aceptables y no interfieran absolutamente en la eficiencia energética y calentamientos excesivos o disparos de protecciones innecesariamente (Duffey y Stratford, 1989).

**Tabla 1. Porcentajes aceptados de perturbaciones armónicas**

	Aplicaciones <u>especiales</u>	Sistema general	Sistema <u>dedicado</u>
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (voltaje)	3%	5%	10%
Notch Area(A <sub>N</sub> )	16400	22800	36500

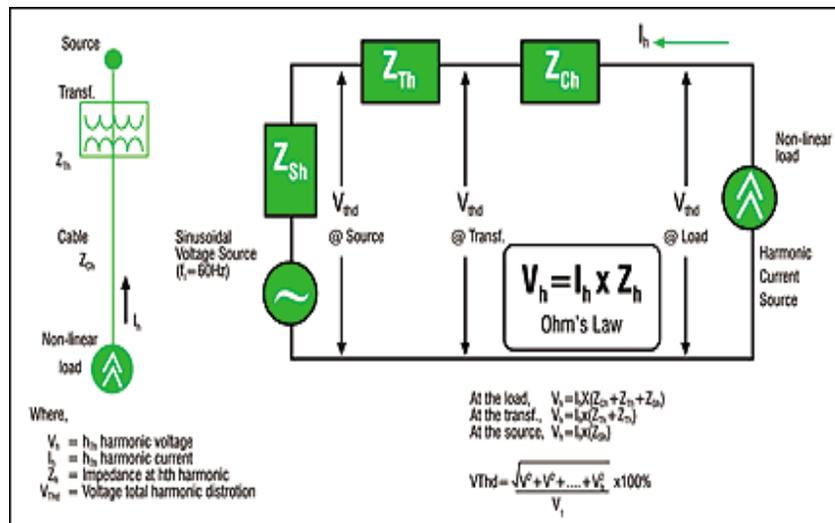
**Fuente:** Duffey y Stratford (1989).

De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que existen repercusiones en la corriente y en el voltaje que pueden ser evaluadas independientemente y en conjunto para establecer los efectos en el consumo energético (Torres, s/f).

La caída de voltaje es importante en este tipo de fenómeno. Según la Figura 2, la caída de tensión en la carga inyectora de armónicos será determinada por la aplicación de la Ley de Ohm, teniendo en cuenta la impedancia armónica:  $V_h = I_h \times Z_h$ , donde  $V_h$ ,  $I_h$  y  $Z_h$  voltaje, corriente e impedancia de acuerdo con el armónico h. Es decir, la presencia de armónicos establece una caída adicional que aumenta la caída en la carga.

Además, el voltaje debido a los armónicos es una contribución de las frecuencias armónicas en función de un promedio geométrico expresado en porcentajes (Contreras, 2006).

**Figura 2. Esquema general de los efectos de los armónicos en una instalación eléctrica**



**Fuente:** Contreras, 2006.



Cada uno de los ítems descritos anteriormente puede analizarse con técnicas de inteligencia artificial, permitiendo con ello la creación de mecanismos inteligentes para el monitoreo de las magnitudes de armónicas y demás fenómenos asociados a estas perturbaciones (Gómez, 2005) (Hernández, 1986).

Los patrones de comparación de presencia de armónicos al ser referenciados con las magnitudes y frecuencias de las ondas de armónicos de corriente y de voltaje en el dominio de la frecuencia, y la identificación o asociación de fallas con cada armónico cuando se desvía de sus valores normales, son posibles aplicarlo a diferentes modos de fallas y así crear reportes que pueden ser en tiempo real con la respectiva y adecuada utilización de instrumentos y equipos de monitoreo es posible disponer de predictores útiles en muchas aplicaciones como la de mantenimiento predictivo (Harper, 2004) (IEEE, 1993).

Estos temas responden a la utilización de software de simulación avanzados, lo que se convierte en estudio obligado cuando existe la disponibilidad de herramientas de elementos finitos para la simulación electromagnética.

La combinación de Matlab y simulink con digilent, ETAP, ATP, PSCAD o cualquier otro software de simulación de sistemas de potencia permiten desarrollar algoritmos de extracción de características y perfiles de armónicos de corrientes, de voltajes, sag, swell y demás perturbaciones relacionadas con transientes provenientes de cargas no lineales o de cualquier otra fuente de armónicos (Pavas, 2011).

De esta forma, es posible construir herramientas supervisoras, de monitoreo o identificación de este tipo de fallas aplicando redes neuronales, sistemas neurodifusos, análisis con lógica difusa y técnicas de optimización, algoritmos genéticos, entre otras, generando con ello respuestas en menor tiempo de computo, significado de alta importancia para efectos de toma de dediciones (Jaakkola, 2001) (Afonso y col., 2007).

La tabla siguiente ilustra el caso de la medición efectuada a un circuito alimentador, para lo cual es necesario simular los armónicos en función de un modelo de línea para determinar las variaciones del comportamiento de las corrientes, voltajes, potencias y demás parámetros de los conductores eléctricos en relación con la demanda y eficiencia energética del mismo (Fink y col., 1984) (Felice, 2001).



**Tabla 2. Porcentajes aceptados de perturbaciones armónicas. Magnitud de las componentes de armónicos en un circuito alimentador**

Armónico	Frecuencia (Hz)	Componente del Armónico
1	60	219
3	180	22
5	300	22.3
7	420	13.7
9	540	4.3
11	660	8.3
13	780	6.61
15	900	1.5
17	1020	3.7
19	1140	6.7
21	1260	3.22

Fuente: elaboración propia.

### TRABAJOS RELACIONADOS

Una visión general de trabajos realizados en el área de inteligencia artificial, siguiendo los pasos de una vigilancia tecnológica permite abordar temas de importancia como algunos de los siguientes (Escorsa y Maspons, s/f):

1. Francisco Javier Alcántara et al. en su trabajo plantean que las redes neuronales adaptativas permiten la estimación de las componentes simétricas de tensión e intensidad en un sistema trifásico de 4 conductores. Para ello, se utilizan los vectores de Park en el tratamiento de las señales usando una celda neuronal adaptativa denominada ADALINE, separando las partes reales e imaginarias de dicho vector y el componente homopolar. Una vez aplicado este análisis matemático, la red neuronal descompone estas partes en sus armónicos calculando las componentes simétricas. Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la nueva metodología:

“Es viable para la determinación de las componentes simétricas de las señales trifásicas según un compromiso aceptable entre exactitud y rapidez. La metodología desarrollada se puede utilizar como base de un procedimiento de medida de los términos de potencia en condiciones de asimetría y distorsión” (Alcántara y Salmerón, 2000).

2. En el trabajo de Vásquez y Pérez (2003) se describen los conceptos generales de la protección contra cortocircuitos de transformadores de potencia, teniendo en cuenta los procedimientos de ajustes para lograr la insensibilización de los relevadores diferenciales evitando así operaciones inadecuadas por efecto de las corrientes de arranque o INRUSH. Se lleva a cabo la comparación entre los métodos actuales proponiendo la utilización de una red de neuronas artificiales para el reconocimiento de la forma de onda de la corriente diferencial, de tal forma que el sistema de protección identifique y diferencie las ondas de una corriente de falla o de cortocircuito y permita la energización del transformador.



Para ello, el nuevo método implica el reconocimiento directo de la forma de onda de la corriente diferencial (Iop) utilizando una red de neuronas artificiales. La red se entrena para reconocer los patrones distintivos de las corrientes de cortocircuito y de magnetización en un transformador, de tal forma que bloquea o permite la operación de la protección diferencial en el arranque de la máquina producto de la corriente de magnetización de la misma. Las validaciones muestran que la RNA discrimina entre corrientes de INRUSH y de cortocircuito, en distintas condiciones de operación y distintos parámetros del sistema de potencia.

3. El proyecto realizado por Salazar (2012) describe el desarrollo de controladores inteligentes utilizados en la "supresión de armónicos en inversores monofásicos con modulación senoidal por ancho de pulso (SPWM)". En el primer resultado obtenido, el controlador PI sirve como modelo de referencia para la extracción de los patrones de entrenamiento de la red neuronal. En la segunda fase, el controlador PD lógico difuso diseñado utiliza una base de 25 reglas difusas. Como complemento de lo anterior, las simulaciones realizadas con el modelo matemático del inversor en MATLAB, reflejan que es posible obtener una onda sinusoidal pura con un mínimo de distorsión armónica total (THD) haciendo uso de los controladores inteligentes propuestos.

Con ello, se logra una tensión de salida con baja distorsión armónica total para un inversor monofásico con modulación senoidal por ancho de pulso (SPWM). El comportamiento de cada uno de los controladores fue medido utilizando cargas lineales y un puente rectificador que trabajó como carga no lineal.

4. En el trabajo de Espinosa (2005) se lleva a cabo el diseño de un controlador basado en redes neuronales para la regulación del voltaje en inversores de una UPS. Esto, con el fin de controlar, reducir o eliminar las formas de onda del voltaje que se utiliza en aplicaciones críticas, por lo que se hace necesario suministrar energía de forma eficiente y segura a procesos automatizados de precisión, aplicaciones de calidad y médicas, como una sala quirúrgica, o en su defecto, un conjunto de instrumentación cuya precisión en sus reportes de lectura dictaminan si una persona sigue con vida o necesita someterse a una operación.

5. El trabajo realizado por Pérez et al. (2002) presenta el diseño del control de un acondicionador activo de potencia (Active Power Line Conditioner, APLC) fundamentado en la combinación de dos tipos de redes neuronales. La primera red efectúa una estimación adaptativa de las señales de consigna a través de neuronas Adaline y la segunda es una red multicapa entrenada mediante el algoritmo back-propagation que permite emular el comportamiento de un relay con histéresis.

La combinación de ambos tipos de redes se aplica al control por modulación de anchura de pulsos (PWM) del APLC con el objetivo de compensar una carga desequilibrada y no lineal. De esta forma, se construye un sistema que instalado en una red de potencia permite la compensación de la potencia reactiva y la eliminación de las componentes de asimetría y los armónicos de la carga. "El control con redes neuronales del APLC se realizó en una tarjeta DSP que permitió ejecutar los modelos del control en tiempo real". Como complemento, se realizaron las pruebas en un circuito trifásico con



una carga desequilibrada y no lineal. Estos resultados permitieron validar la ejecución del diseño propuesto y contrastar la respuesta dinámica del sistema.

6. Villada et al. (2007) proponen su trabajo sobre el desarrollo de un prototipo digital utilizando un procesador de señales digitales DSP, al cual se le han incorporan dos algoritmos para diagnosticar fallas en el estator de motores de inducción. Ante esto, los autores mencionados alegan:

“El primer algoritmo utiliza las redes neuronales artificiales para estimar la corriente de secuencia negativa, la cual es utilizada como indicador de falla. El segundo algoritmo utiliza la impedancia de secuencia inversa como indicador de falla. Los resultados obtenidos incluyen el diseño experimental en un motor de 3 HP utilizando medida en línea a través del prototipo digital”.

7. El trabajo de Rukonuzzaman y Nakaoka (2001) presenta el diseño de un filtro avanzado de potencia activa para la compensación de componentes de corrientes armónicas instantáneas en carga no lineal actual.

Presenta una técnica de procesamiento de señal utilizando un algoritmo adaptativo de red neuronal que se aplica para la detección de componentes armónicas generadas por cargas de corriente no lineales y de manera eficiente determina las componentes armónicas instantáneas en tiempo real.

La estrategia de control de las señales de conmutación para compensar la corriente armónica del inversor se plantea de igual forma y las señales de conmutación se generan con el esquema de modulación de tensión de espacio vectorial. La validez de este sistema de procesamiento de filtros activo para compensar los armónicos de corriente se prueba sobre la base de los resultados de simulación

Como conclusiones de esta primera aproximación a la realización de un estudio más avanzado, es posible concluir que la aplicación de las técnicas de inteligencia artificial combinada con técnicas estadísticas tradicionales o no, permite construir herramientas de procesamiento de alta capacidad de procesamiento generando respuestas que ayudan en la toma de decisiones para el mejoramiento de los sistemas eléctricos, en especial para determinar características propias de eventos asociados con transientes, armónicos y demás fenómenos propios de las cargas no lineales en sistemas de potencia eléctricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, João.; Batista, J.; Sepúlveda, M. y Martins, J. (2007). Sistema digital de bajo coste para la monitorización de la calidad de energía eléctrica. Información tecnológica. Volumen 18, número 4. (Pp. 15-23).

Alcántara, F. y Salmerón, P. (2000). Estimación de las componentes simétricas mediante redes neuronales adaptativas. X reunión de grupos de investigación en ingeniería eléctrica. Marzo, España.



- Contreras, I. (2006). Armónicos y la norma IEEE 519 1992: Documento en línea. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=570>. Consulta: 15/05/2012.
- Duffey, C. y Stratford, R. (1989). Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. Industry Applications, IEEE Transactions. Volumen 25, edición 6. (Pp. 1025-1034).
- Escorsa, P. y Maspons, R. (s/f). Módulo 8: la vigilancia tecnológica, un requisito indispensable para la innovación. Documento en línea. Disponible en: <http://www.uned.es/experto-universitario-gestion-I-D/bibliografia/bibliografia%202/BIBLIOGRAFIA/La%20vigilancia%20tecnologica%20un%20requisito%20indispensable%20para%20la%20innovacion.pdf>. Consulta: 12/05/2012.
- Espinosa, I. (2005). Regulación del voltaje en inversores UPS (Uninterruptible Power Supply) mediante un controlador basado en redes neuronales. Revista del Centro de Investigación. Volumen 6, número 23. (Pp. 11-19).
- Felice, E. (2001). Perturbaciones Armónicas. España. Ediciones Paraninfo.
- Fink, D.; Wayne, H. y Carroll, J. (1984). Manual práctico de electricidad para ingenieros. España. Editorial Reverte.
- Gómez, J. (2005). Calidad de potencia: para usuarios y empresas eléctricas. Argentina. Editorial Edigar.
- Harper, E. (2004). El ABC de la calidad de la energía eléctrica. México. Editorial Limusa.
- Hernández, E. (1986). Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración. México. Editorial Limusa.
- Hoevenaars, T.; LeDoux, K. y Colosino, M. (2003). Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications. Documento en línea. Disponible en: <http://www.mirusinternational.com/downloads/Interpreting-IEEE-Std-519-and-Meeting-Harmonic-Limits-VFDs-PCIC-2003-15.pdf>. Consulta: 15/05/2013.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) (1992). Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. España. IEEE.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) (1993). 519-1992 - IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. Estados Unidos. IEEE Industry Applications Society.



- Jaakkola, J. (2001). Filtros del tercer armónico. Puesta a punto para una mejor calidad de la energía. Documento en línea. Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/3b83445e16745e6ec1256ddd0034711a/\\$file/46-51%20M644%20-%20SPA.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/3b83445e16745e6ec1256ddd0034711a/$file/46-51%20M644%20-%20SPA.pdf). Consulta: 16/05/2012.
- Noriega, E. (2005). Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía. Documento en línea. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos21/armonicos/armonicos.shtml#ixzz2wWf0d0XW>. Consulta: 14/05/2012.
- Pavas, A. (2011). Calidad del suministro de la energía eléctrica. Documento en línea. Disponible en: <http://empresas.micodensa.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/calidad-de%20energ%C3%ADa-24-11-2011.pdf>. Consulta: 16/05/2012.
- Pérez, A.; Prieto, J.; Salmerón, P. y Vásquez, J. (2002). Diseño y realización de un acondicionador activo de potencia para compensación estática de cargas no lineales. XII reunión de grupos de investigación en ingeniería eléctrica. Marzo, España.
- Rukonuzzaman, M. y Nakaoka, M. (2001). An advanced active power filter with adaptative neural network based harmonic detection scheme. Powers Electronics Specialists Conference. Volumen 3. (Pp. 1602-1607).
- Salazar, J. (2012). Diseño y análisis de desempeño de un inversor de voltaje utilizando controladores inteligentes. Ecuador. Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército Sangolquí.
- Torres, H. (s/f). Calidad de la energía eléctrica CEL. Documento en línea. Disponible en: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Grupo%20de%20Participacion%20Ciudadana/PresentacionSimposioVI-II.pdf>. Consulta: 16/05/2012.
- Vásquez, E. y Pérez, J. (2003). Aplicación de RNA en la identificación de corrientes de INRUSH en transformadores. Revista Ingenierías. Volumen VI, número 20. (Pp. 24-33).
- Villada, F.; Velásquez, R. y Cadavid, D. (2007). Diseño y construcción de un prototipo digital para diagnosticar fallas en motores de inducción. DYNA. Volumen 74, número 153. (Pp. 215-222).