

METODOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL MODELADO Y ANÁLISIS DE ARMONICOS Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DE LA ENERGIA

Aurelio Medina

Facultad de Ingeniería Eléctrica
División de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Edificio de la División de Estudios de Posgrado de la FIE
Ciudad Universitaria, 58030
Morelia, Mich., MÉXICO
amedina@zeus.ccu.umich.mx

Resumen: Este artículo describe la experiencia obtenida en el desarrollo y utilización de diferentes técnicas para el modelado y análisis de sistemas de potencia con componentes no lineales y variantes en el tiempo, para estudios precisos de armónicos y su impacto en la calidad de la energía. Estas metodologías han sido desarrolladas en los marcos de referencia del tiempo, la frecuencia e híbrido frecuencia y tiempo. Se detalla su aplicación en la obtención de la solución periódica en estado estacionario de varios sistemas de prueba, mencionándose sus ventajas y limitantes en términos de eficiencia, necesidades computacionales y precisión..

Palabras Clave: No lineal, variante en el tiempo, calidad de la energía, híbrido, estado estacionario periódico.

1. INTRODUCCION

Bajo condiciones ideales de operación, un sistema eléctrico de potencia se espera sea completamente balanceado, de una frecuencia única y constante y las formas de onda de voltaje y corriente en el sistema senoidales, de amplitud especificada y constante. La calidad de la energía obtenida es entonces perfecta. Desafortunadamente, esta operación ideal no se presenta en sistemas de potencia prácticos debido a que todos los componentes de la red, en menor o mayor grado, poseen la indeseable característica de distorsionar las formas de ondasenoidales ideales. La mayor contribución a este efecto distorsionante, conocido como distorsión armónica de la forma de onda, proviene de cargas y componentes no lineales y variantes en el tiempo. Ejemplos de fuentes bien

conocidas de distorsión armónica son el convertidor de potencia, dispositivos FACTS y el fenómeno no lineal de saturación en componentes de núcleo magnético, entre otros. Esto puede resultar en un considerable efecto degradante en la calidad de la energía ocasionando, entre otros aspectos adversos, la presencia de pérdidas adicionales en el sistema, reducción en la vida útil del equipo e interferencia con equipo de protección, control y comunicación.

Importante experiencia práctica acumulada en distintos aspectos de la distorsión armónica, tales como sus causas, estándares, medidas, eliminación, así como su efecto en la calidad de la energía en sistemas de potencia ha sido ya compilada y se encuentra disponible en la literatura [1-2].

La detección y la predicción de armónicos constituyen los dos campos principales del análisis digital de armónicos, que permiten hacer una evaluación y diagnóstico de la calidad de la energía. El primer campo determina y procesa en tiempo real la información del contenido armónico monitoreado en la red mientras que el último predice la distorsión armónica en la red mediante modelos analíticos implementados para simulación digital. A la última categoría corresponden las técnicas descritas en esta contribución.

El dominio de la frecuencia, el método más simple de análisis utiliza el marco de referencia de las componentes de secuencia para determinar la propagación de corrientes armónicas características mediante inyección de fuentes de corriente ideales en la red eléctrica [3]. En una contribución posterior la solución de un sistema trifásico se obtiene directamente en el marco de referencia de las fases [4]. En los trabajos previos se resuelve la red completa para cada armónico de interés, considerando que los armónicos están desacoplados.

Una técnica de Análisis Iterativa de Armónicos (IHA), basada en sustituciones sucesivas del tipo Gauss-Seidel se ha utilizado para evaluar la distorsión armónica producida por componentes tales como el convertidor [5] y el transformador de potencia [6]. El estrecho margen de estabilidad y la característica de lenta convergencia de la técnica Gauss-Seidel ha limitado su aplicación para la

Artículo recomendado y aprobado por el comité Nacional de CIGRE México para presentarse en el segundo congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

solución de problemas prácticos en sistemas de potencia. Se requiere contar con una dominancia numérica de la diagonal principal de la matriz de parámetros del sistema para asegurar la convergencia del método. Esta, sin embargo, no es una condición satisfecha por sistemas débiles o ligeramente cargados. En otra contribución, se propone un método para mejorar las características de convergencia del método IHA [7].

Los armónicos producidos por componentes no lineales y variantes en el tiempo están además acoplados. Técnicas convencionales como las descritas anteriormente no pueden representar este fenómeno. Sin embargo ya ha sido representado en modelos detallados de la máquina síncrona [8-10], el transformador de potencia [11], hornos de arco [12], TCRs [13] y convertidor [14].

Modelos analíticos en el dominio de la frecuencia para describir el comportamiento periódico de componentes lineales y no lineales han sido combinados para formar un marco de referencia más general para análisis de armónicos en sistemas de potencia. En este marco de referencia, denominado Dominio Armónico [15], los nodos, fases, armónicos y acoplamiento entre armónicos se representan explícitamente, obteniéndose una solución unificada para la red completa mediante un procedimiento iterativo tipo Newton.

Ahora bien, el comportamiento periódico de una red eléctrica puede ser determinado directamente en el dominio del tiempo mediante la integración de las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema una vez que la respuesta transitoria ha transcurrido y se obtiene el estado estacionario periódico [16]. Este procedimiento, conocido como de Fuerza Bruta [17] requiere generalmente de integrar sobre un número considerable de periodos de tiempo para que los transitorios decaigan a proporciones despreciables. Ha sido sugerido únicamente para casos en que el estado estacionario periódico pueda ser alcanzado rápidamente en pocos periodos de tiempo [6]. Este caso generalmente se presenta en sistemas donde se consideran fuentes ideales y que además se tiene suficiente amortiguamiento.

Se ha propuesto una técnica para obtener la solución periódica en estado estacionario del sistema sin requerir calcular el transitorio completo [18]. Este método esta basado en un algoritmo de solución del sistema por medio de iteraciones Newton. Más recientemente se ha introducido una novedosa metodología para la rápida obtención en el dominio del tiempo de la solución periódica en estado estacionario de sistemas eléctricos con componentes no lineales y variantes en el tiempo [19]. Se fundamenta en la aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Limite [17], uso de Mapas de Poincaré [17][20] y aplicación de métodos

iterativos del tipo Newton. Esta técnica se ha utilizado con éxito en el modelado en el dominio del tiempo de componentes tales como la máquina síncrona [21], transformador de potencia [22], hornos de arco [23], TCRs [24], TSCs [25] y de sistemas que contienen una combinación de dichos componentes [26]. Sin embargo, su aplicación se ha limitado hasta ahora a la solución de redes de pequeña y mediana escala. Los detalles conceptuales y analíticos en que se fundamentan las metodologías antes mencionadas se describen en las siguientes secciones.

2. METODOLOGÍAS

2.1 Dominio Armónico. Esta basado en un proceso de linealización alrededor de un particular punto de operación de componentes no lineales y variantes en el tiempo. Se obtiene así una relación lineal entre voltajes y corrientes armónicas. Esta condición es válida únicamente en una proximidad muy cercana al punto de operación. Como resultado del proceso de linealización se obtiene un equivalente Norton armónico en donde explícitamente esta representado el efecto de acoplamiento entre armónicos y desbalance entre fases [15]. El cálculo de dicho equivalente puede no ser fácil y para obtener resultados precisos debe ser actualizado iterativamente. Este esfuerzo computacional se incrementa en proporción directa al tamaño del sistema analizado y al número de armónicos representados explícitamente. La solución iterativa unificada del sistema es de la forma,

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

en donde ΔI es el vector de corrientes incrementales, que contiene la contribución de componentes no lineales, ΔV es el vector de voltajes incrementales y $[Y]$ es la matriz de admitancias de componentes lineales y no lineales. Estas últimas corresponden en cada caso al equivalente Norton armónico obtenido. Esta metodología ha sido reportada como robusta numéricamente y con buenas características de convergencia [15].

2.2 Dominio del Tiempo. Es este la descripción general de elementos no lineales y variantes en el tiempo se realiza en terminos de la ecuación diferencial siguiente,

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2)$$

donde x es el vector de estados de m elementos.

La ineficiencia de la solución convencional de (2) mediante algún proceso de integración numérica, tal como el Runge-Kutta, ha imposibilitado su aplicación generalizada para obtener la solución

periodica en estado estacionario de sistemas eléctricos con componentes no lineales y variantes en el tiempo, aún cuando en principio y en ausencia de inestabilidad numérica este proceso conduce a su solución precisa o “exacta” [17].

2.2.1 Convergencia al Ciclo Limite. Técnicas de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Limite mediante métodos Newton en el dominio del tiempo han sido desarrolladas con el propósito de eliminar la severa limitante de aplicación e ineficiencia computacional de los métodos convencionales de Fuerza Bruta para obtener las soluciones periódicas de sistemas eléctricos de potencia [19].

Fundamentalmente, para la deducción de estos métodos Newton se parte del razonamiento de que la solución en estado estacionario $x(t)$ de (2) es T -periódica y puede ser representada como un Ciclo Limite para x_k en términos de otro elemento periódico de x o en términos de una función arbitraria T -periódica, originándose así una orbita. Antes de alcanzar el Ciclo Limite, los ciclos de la orbita transitoria están muy cercanos a este. Su posición esta descrita adecuadamente mediante su ubicación en el Plano de Poincaré [17]. Un solo ciclo “mapea” su punto de inicio x^i a su punto final x^{i+1} y además mapea, a partir de un Ciclo Base [19], un segmento de perturbación Δx^i a Δx^{i+1} . Todos los mapeos cercanos al Ciclo Limite son quasi-lineales, tal que puede utilizarse un método Newton para obtener el punto de inicio x^∞ del Ciclo Limite.

Es posible aprovechar la linealidad existente en la vecindad de un Ciclo Base si (2) se linealiza alrededor de una solución $x(t)$ de t_i a t_{i+T} obteniéndose el problema variacional,

$$\Delta \dot{x} = J(t)\Delta x \quad (3)$$

donde $J(t)$ es la matriz Jacobiana T -periódica.

Note que (3) permite la aplicación de algoritmos tipo Newton para extrapolar la solución al Ciclo Limite, la cual es obtenida como [19],

$$x^\infty = x^i + C(x^{i+1} - x^i) \quad (4)$$

donde $C = (I - B)^{-1}$.

2.3 Método Híbrido. Las ventajas esenciales de los dominios de la frecuencia y del tiempo se utilizan en la metodología híbrida, en donde los componentes del sistema de potencia se representan directamente en sus marcos de referencia naturales. Es decir, los lineales en el dominio de la frecuencia y los no

lineales y variantes en el tiempo en el dominio del tiempo, aplicando en estos últimos las técnicas de aceleración al Ciclo Limite descritas previamente para la eficiente determinación de su estado estacionario periódico. La Figura 1 ilustra la representación conceptual de la metodología híbrida. Los voltajes V en los nodos de carga en que los componentes no lineales se encuentran conectados se obtienen iterativamente. Partiendo de valores estimados de V se calculan las corrientes I_L de la parte lineal para cada armónico h utilizando $[Y_h]$. Para la parte no lineal, V se considera en el dominio del tiempo como la función periódica $v(t)$ para obtener $i(t)$, la cual es transformada a I_N en el dominio de la frecuencia. La solución iterativa para todo el sistema es de la forma de la Ecuación (1). En convergencia $\Delta I = I_L + I_N$ tiende a cero.

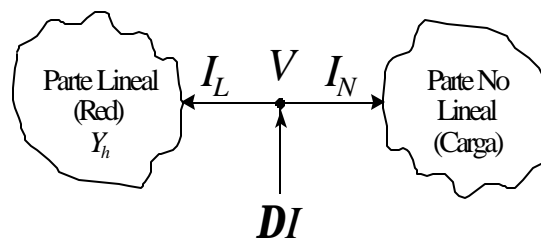


Fig. 1 Sistema visto desde nodos de carga

3. CASOS DE ESTUDIO

3.1 Aplicación del Dominio Armónico. El potencial del Dominio Armónico como marco de referencia para el análisis de armónicos y su impacto en la calidad de la energía de sistemas de potencia se demuestra con su aplicación al sistema de transmisión práctico Jaguara-Taquaril [27], modificado para incluir una carga al final de la línea de transmisión de 398 km., según se ilustra en la Figura 2(a). Modelos polifásicos detallados en el Dominio Armónico de generador, transformador de potencia y línea de transmisión se han utilizado para este estudio de la determinación de la interacción de armónicos entre el sistema de generación y transmisión. Los detalles de la formulación y datos de prueba de estos componentes han sido reportados previamente y se encuentran disponibles en la literatura [15]. El modelo del generador incorpora los efectos de interacción armónica entre estator y rotor y saturación magnética [10]. El modelo general del transformador considera el núcleo magnético de columnas múltiples (3 o 5), en donde el fenómeno de saturación se representa en sus distintas regiones [11]. Se incorporan además los efectos de acoplamiento de armónicos y de conexiones eléctricas de devanados. La línea de transmisión esta representada con un modelo

dependiente de la frecuencia en donde se toma en consideración el efecto de línea larga [15].

La Figura 2(b) ilustra la respuesta obtenida en el nodo 4, al final de la línea de transmisión. Las formas de onda distorsionadas de voltaje y su contenido armónico mostrado en la Figura 2(c) ilustran el efecto combinado del desbalance intrínseco del sistema, saturación e interacción de armónicos entre estator-rotor en el generador, saturación del transformador, núcleo magnético (3 columnas), configuración eléctrica (estrella aterrizada-delta) y efecto de la línea de transmisión.

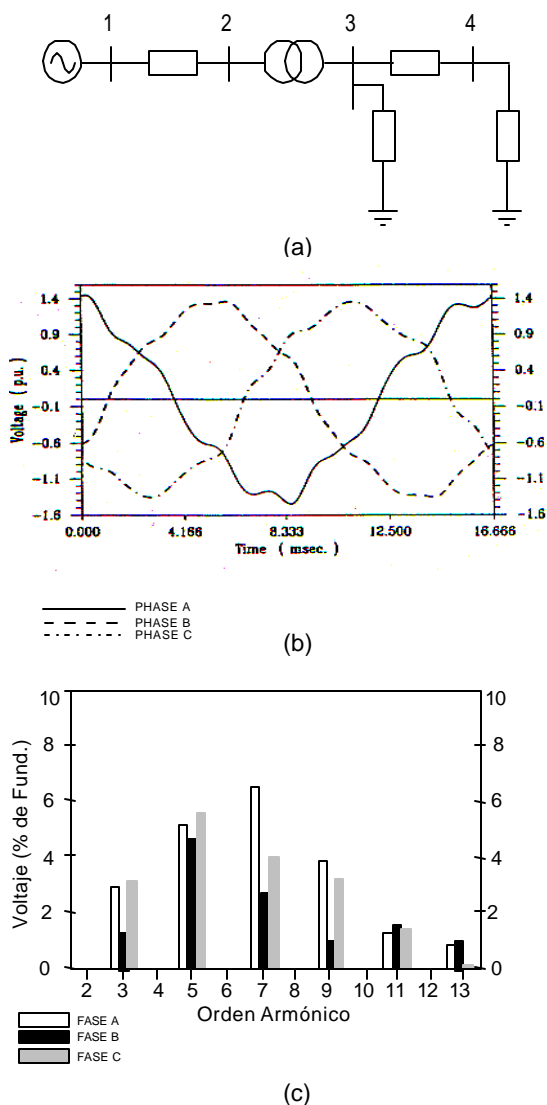


Fig. 2. Caso de estudio 1. (a) Sistema de prueba 1; (b) Voltajes en nodo 4; (c) Contenido armónico de voltajes en nodo 4

3.2 Aplicación de Técnicas de Aceleración al Ciclo Limite. La Figura 3 ilustra el caso de una red de 3 nodos con ramas magnetizantes y hornos de arco conectados en los nodos 2 y 3, respectivamente, dos capacitores en derivación y tres líneas de transmisión. La dinámica del sistema se representa por medio de once ecuaciones diferenciales ordinarias. La fuente se considera senoidal de $1.0 p.u.$ de amplitud. El Ciclo Limite se localiza dentro de un error máximo de $10^{-10} p.u.$

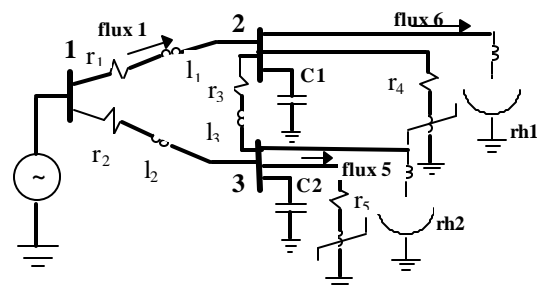


Fig. 3 Sistema de prueba 2.

La solución en estado estacionario periódico del sistema se obtiene en 79 periodos de tiempo utilizando el método de Fuerza Bruta (FB) y en 56 utilizando los métodos Newton de aceleración de la convergencia al Ciclo Limite basados en los procesos de Aproximación Directa (AD) y Diferenciación Numérica (DN) respectivamente [19], ver Tabla 1. El voltaje a través del capacitor C1 y su contenido armónico se muestran en las Figuras 4(a) y (b), respectivamente. Se observa una considerable distorsión armónica en el voltaje del capacitor, ver Figura 4(a), debido principalmente a la fuerte inyección de armónicos del los horno de arco. Para este caso en particular se tiene un contenido considerable de armónicos de orden superior. Para este caso el armónico 15 es aproximadamente 30% de la fundamental.

Tabla 1. Errores en convergencia de métodos AD y DN.

NFC	Fuerza Bruta	Método AD	Método DN
8	2.0454e-002	2.0454e-002	2.0454e-002
20	6.6126e-004	9.4284e-003	9.4284e-003
32	2.7154e-005	4.2512e-005	4.2510e-005
44	1.1015e-006	8.6676e-010	8.6957e-010
56	4.4521e-008	8.4932e-015	1.1643e-014
:	:	:	:
79	9.4800e-011		

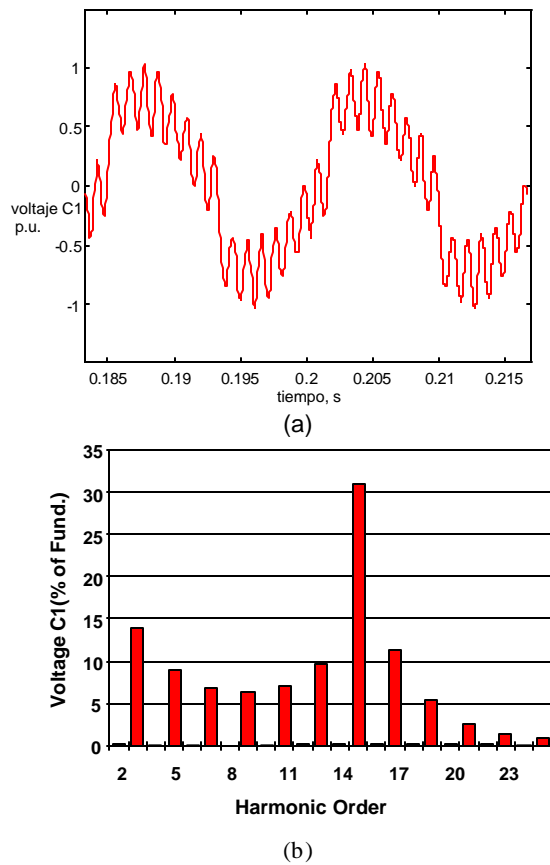


Fig. 4. Voltaje y contenido armónico en capacitor C1. (a) Voltaje v_{C1} ; (b) Contenido armónico.

3.3 Aplicación de Metodología Híbrida. El método híbrido se ha aplicado con éxito para obtener la solución periódica en estado estacionario de sistemas grandes [19]. Sin embargo, hasta ahora el análisis se ha realizado con sistemas de prueba monofásicos, tales como los sistemas de prueba del IEEE 14, 30, 57 y 118 nodos [28]. En la Tabla 2 se reproducen los resultados obtenidos y reportados en [19] con el sistema de prueba de 118 nodos. Se indican tres nodos del sistema en donde se han conectado cargas no lineales, del tipo de rama magnetizante de un transformador. La convergencia fué obtenida en 4 iteraciones con un criterio de convergencia de 10^{-6} p.u.

Tabla 2. Voltajes armónicas, sistema IEEE-118.

Armónico	Nodo 7	Nodo 107	Nodo 118
1	0.98913	0.99158	0.95101
3	2.637e-03	2.305e-03	1.786e-03
5	3.294e-05	1.265e-04	6.060e-05

4. CONCLUSIONES

Se han descrito los principios en que se fundamentan las metodologías para el análisis de armónicos, desarrolladas en los marcos de referencia de la frecuencia, el tiempo e híbrido frecuencia-tiempo. Se ha dado de manera concisa el detalle de su formulación analítica y proceso iterativo.

Se han presentado varios casos de estudio para ilustrar la aplicación práctica de las distintas metodologías para obtener la solución periódica en estado estacionario de sistemas eléctricos con componentes no lineales y variantes en el tiempo, indicándose los aspectos relevantes asociados con su precisión y eficiencia computacional.

Se ha analizado el potencial de las metodologías y marcos de referencia utilizados para la predicción de la distorsión armónica en sistemas de potencia y el impacto que este análisis tiene en la calidad de la energía.

El Dominio Armónico es un marco de referencia en que se han desarrollado modelos polifásicos rigurosos de componentes no lineales y lineales del sistemas de potencia. Sin embargo, aún cuando es robusto, su aplicación para la obtención de la solución periódica no senoidal de sistemas de potencia puede requerir de dimensiones considerables para su representación. Metodologías convencionales desarrolladas en el dominio del tiempo para la determinación del estado estacionario periódico de sistema eléctrico son generalmente una alternativa ineficiente y que puede resultar poco confiable, sobre todo en la solución sistemas pobremente amortiguados. Se ha demostrado como alternativa, el potencial de las técnicas Newton de aceleración de la convergencia al Ciclo Limite en el dominio del tiempo. Se ha ilustrado que la metodología híbrida de solución es una opción de solución potencial interesante en virtud de que permite representar los elementos del sistema de potencia en sus marcos de referencia naturales, haciendo eficiente, robusta y precisa la solución en el dominio del tiempo y de toda la red. Se ha aplicado a la fecha a la solución de sistemas monofásicos, estando en proceso su aplicación a sistemas polifásicos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a través de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley and Sons, 1985.
- [2] M.H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems", IEEE Press, 2000.
- [3] A.A. Mahmoud, R.D. Schultz, "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1982, Págs. 1815-1824.
- [4] T.J. Demsem, P.S. Bodger, J. Arrillaga, "Three Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, Febrero, 1984, Págs. 310-317.
- [5] C.D. Callaghan, J. Arrillaga, "Convergence Criteria for Iterative Harmonic Analysis and its Application to Static Convertors", IEEE/ICHPS IV International Conference on Harmonics in Power Systems, Budapest, Hungría, Octubre 4-6, 1990, Págs. 38-43.
- [6] H.W. Dommel, A. Yan, S. Wei, "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, Abril, 1986, Págs. 209-214.
- [7] C.D. Callaghan, J. Arrillaga, "A Double Iterative Algorithm for Iterative Harmonic Analysis and Harmonic Flows at ac-dc Terminals", Proceedings of the IEEE, Vol. 136, No. 6, Págs. 319-324.
- [8] J.D. Roark, C.A. Gross, "Unbalanced Synchronous Machine Analysis Using Frequency Domain Methods", Artículo 78 SM 524-1 presentado en IEEE/PES Summer Power Meeting 1978.
- [9] W.W. Xu, J.R. Marti, H.W. Dommel, "A Synchronous Machine Model for Three-Phase Harmonic Analysis and EMTP Initialization", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 4, Noviembre 1991, Págs. 1530-1538.
- [10] A. Medina, J. Arrillaga, J.F. Eggleston, "A Synchronous Machine Model in the Harmonic Domain", IEEE ICEM92 International Conference on Electrical Machines, Manchester, UK, Septiembre 15-17, 1992, Págs. 647-651.
- [11] Generalised Modelling of Power Transformers in the Harmonic Domain", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, Julio 1992, Págs. 1458-1465.
- [12] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic, "A Harmonic Domain Computational Package for Nonlinear Problems and its Application to Electric Arcs", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, Págs. 1390-1397.
- [13] E. Acha, J.J. Rico, S. Acha, M. Madrigal, "Harmonic Domain Modelling of the Three Phase Thyristor-Controlled Reactors by Means of Switching Vectors and Discrete Convolutions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, 1996, Págs. 1678-1684.
- [14] B.C. Smith, A. Wood, J. Arrillaga, "A Steady State Model of the AC-DC Converter in the Harmonic Domain", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 2, 1995, Págs. 109-118.
- [15] A. Medina, "Power System Modelling in the Harmonic Domain", PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1992.
- [16] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, Abril 1969, Págs. 388-399.
- [17] T.S. Parker, L.O. Chua, "Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems", Springer-Verlag, 1989.
- [18] T.J. Aprille, T.N. Trick, "A Computer Algorithm to Determine the Steady State Response of Nonlinear Oscillators", IEEE Transactions on Circuit Theory, Vo. 9, No. 4, 1972, Págs. 354-360.
- [19] A. Semlyen, A. Medina, "Computation of the Periodic Steady State in Systems with Nonlinear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology", IEEE Transactions on Power Systems.
- [20] J. Guckenheimer, P. Holmes, "Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields", Springer-Verlag, 1997.
- [21] O. Rodríguez, A. Medina, "Fast Periodic Steady State Solution of a Synchronous Machine Model in Phase Coordinates Incorporating the Effects of Magnetic Saturation and Hysteresis", Proceedings of the IEEE PES 2001 Winter Meeting, Enero-Febrero 2001, Columbus, Ohio, USA.
- [22] S. García, "Modelo del Transformador Trifásico en el Dominio del Tiempo y Análisis de su Operación en Estado Transitorio y Estado Estacionario Periódico", Tesis de Maestría, UMSNH, Morelia, México, 2000.
- [23] A. Medina, N. García, "Dynamic Análisis of Electric Arcs Using a Time Domain Newton Technique", Proceedings of the IEEE International Power Electronics Congress, Octubre 1998, Morelia, México, Págs. 82-88.
- [24] N. García, A. Medina, "Efficient Computation of the Periodic Steady-State Solution of Systems Containing Nonlinear and Time-Varying Components. Application to the Modeling of TCRs", Proceedings of the IEEE ICHQP, Orlando FL, USA; 2000, Vol. 2, Págs. 673-678.
- [25] N. García, A. Medina, "Fast Periodic Steady State Solution of Systems Containing Thyristor Switched Capacitors", Proceedings of the IEEE PES 2000 Summer Meeting, Seattle, Julio 2000, Vol. 2, Págs. 1127-1132.
- [26] A. Medina, N. García, "Newton Methods for the Fast Computation of the Periodic Steady-State Solution of Systems with Nonlinear and Time-Varying

Components”, Proceedings of the IEEE PES 1999 Summer Meeting, Edmonton, Alberta, Canada, Julio 1999, Págs. 664-669.

[27] H. W. Dommel, A. Yan, R.J.O. de Marcano, “Case Studies for Electromagnetic Transients”, Internal Report, Department of Electrical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1983.

[28] L.L. Freris, A.M. Sasson, “Investigation of the Load Flow Problem”, Proceedings of the IEE, Vol. 115, No. 10, Octubre 1968, Págs. 1450-1460.

BIOGRAFIA

Aurelio Medina. Obtuvo su Doctorado de la Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelandia en 1992. Ha trabajado como Post-Doctoral Fellow en la Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelandia (1 año) y en la Universidad de Toronto (2 años). Actualmente es Profesor Investigador de Tiempo Completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en donde ocupa el puesto de Jefe de la División de Estudios de Posgrado. Sus intereses de investigación se centran en el análisis dinámico y en estado estacionario de sistemas de potencia, con énfasis especial en armónicos y calidad de la energía y modelado y análisis de fuentes renovables de energía