



ITESO

Universidad Jesuita
de Guadalajara

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente
Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática**

**Breve Revisión Histórica del Diseño Asistido por la Computadora
de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, y algunas Tendencias Futuras**

Dr. José Ernesto Rayas Sánchez

Enero 2020

Breve Revisión Histórica del Diseño Asistido por la Computadora de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, y algunas Tendencias Futuras

Dr. José Ernesto Rayas Sánchez

Enero 2020

LOS ORÍGENES

El diseño asistido por la computadora (CAD, por sus siglas en inglés) de circuitos electrónicos ha experimentado una evolución espectacular. Partió de un conjunto de algoritmos y simuladores rudimentarios y de propósito específico, hasta llegar al desarrollo de una variedad de sistemas de software de propósito general, altamente flexibles e interactivos, con impresionantes capacidades de visualización.

Los primeros esfuerzos por utilizar la computadora como herramienta de diseño fueron hechos en el área de síntesis de filtros [1]. A mediados de los años cincuentas se desarrollaron un conjunto de técnicas automatizadas de diseño. Aaron [2] propuso por primera vez el uso de mínimos cuadrados para la implementación de funciones de transferencia que aproximan un conjunto de especificaciones de diseño. Desoer y Mitra [3], Calahan [4] y Smith y Temes [5] realizaron contribuciones históricas al desarrollo de métodos iterativos de optimización para clases específicas de filtros, siguiendo la filosofía de Aaron.

LOS PRIMEROS SIMULADORES

Al mismo tiempo que las técnicas de síntesis estaban siendo desarrolladas, el área de simulación de circuitos experimentaba avances significativos. Simuladores de circuitos lo suficientemente genéricos eran indispensables para demostrar que la computadora podía ser una herramienta eficiente de diseño. Los primeros intentos de simulación de circuitos mediante la computadora se limitaron a más o menos implementar métodos estándares de análisis de redes. Aparecieron entonces los primeros programas de simulación de propósito general: TAP [6], CORNAP [7], ECAP [8] y AEDNET [9].

Con los avances en las técnicas de matrices ralas, en los métodos de integración numérica, en los métodos para el cálculo de sensibilidad (técnica de la Red Adjunta [10]), y en las técnicas para formular las ecuaciones del circuito (Tableau [11], Análisis Nodal Modificado [12], etc.), los primeros programas de simulación de propósito general y computacionalmente eficientes aparecieron: ECAP-II [13], SLIC [14] y CANCER [15]. A partir de este último evolucionó, a mediados de los setentas, SPICE [16-18], el cual se convirtió en el más popular de los simuladores de circuitos de propósito general [19].

LA SIMULACIÓN SE ESPECIALIZA

La creciente accesibilidad a computadoras personales de bajo costo y alto rendimiento que se experimentó durante los ochentas y noventas, así como el continuo progreso en técnicas numéricas y en ingeniería de software, convirtieron a los sistemas de CAD en herramientas de trabajo cotidiano para la mayoría de los diseñadores de circuitos. Esta explosión de herramientas de software para análisis y diseño de circuitos evolucionó en cuatro avenidas relativamente separadas: CAD de baja frecuencia y modo mezclado, CAD para sistemas electrónicos de potencia, CAD analógico para alta frecuencia, y CAD electromagnético.

CAD DE BAJA FRECUENCIA Y MODO MEZCLADO

La simulación en modo mezclado surgió a principios de los ochentas como una alternativa para aumentar la velocidad de simulación de los circuitos de alta escala de integración [20]. En la simulación de modo mezclado, una parte del circuito se simula a nivel eléctrico (simulación tipo SPICE) mientras que otra parte se simula a nivel lógico [21-23]. En nuestros días, la arena del CAD de baja frecuencia en modo

mezclado típicamente incluye las áreas de lenguajes de diseño digital (VHDL, Verilog, etc.), herramientas de diseño analógico/digital, diseño de circuitos integrados digitales, modelado de dispositivos activos, diseño de circuitos integrados de aplicación específica (ASICs), diseño de dispositivos lógicos programables (PLDs/FPGAs), diseño de circuitos impresos, co-diseño y co-verificación de hardware y software. Todas estas herramientas de CAD han sido moldeadas significativamente por las necesidades de la industria de los circuitos integrados, y usualmente son referidas como herramientas de diseño electrónico automatizado (*Electronics Design Automation*, EDA). Un análisis y proyección en esta arena puede consultarse en [24-26].

CAD PARA SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

Los simuladores circuitales tipo SPICE no han sido tan ampliamente utilizados en el estudio de sistemas electrónicos de potencia como lo han sido para el estudio de circuitos integrados. Esto se debe a los problemas de inestabilidad numérica por la utilización de modelos inadecuados para los convertidores y dispositivos electrónicos de conmutación (tiristores, etc.) [27]. Lo anterior estimuló el desarrollo de simuladores especializados en sistemas electrónicos de potencia, tales como el PECAN [28] y ATOSEC [29], en los cuales los tiristores son modelados asumiendo ciertas simplificaciones que evitan la inestabilidad numérica. La posibilidad de que el usuario defina nuevos dispositivos de potencia en el simulador de una manera flexible ha derivado nuevas arquitecturas de simulación, como en SABER [30] y en SEQUEL [31], éste último introducido como software de dominio público.

CAD ANALÓGICO PARA ALTA FRECUENCIA

El área de CAD analógico para alta frecuencia se ha enfocado hacia el desarrollo de herramientas de análisis y diseño de circuitos distribuidos. Estas herramientas usualmente proveen de capacidades para el modelado de dispositivos basado en aproximaciones quasi-estáticas (basados en teoría de líneas de transmisión), simulación de circuitos lineales y no-lineales, análisis en el dominio de la frecuencia, análisis en régimen transitorio, y análisis no lineal en el dominio del tiempo en estado estable (Balance de Armónicos [32,33]). Algunos ejemplos de esta familia de herramientas CAD para circuitos de alta frecuencia son Touchstone [34], Super-Compact [35], OSA90 [36], Transim [37], Ansoft Designer [38], APLAC [39,40], Keysight ADS [41] y Qucs [42]. Algunas de estas herramientas de CAD también proveen de capacidades de interfase a simuladores electromagnéticos para la verificación de diseño y optimización. Recientemente se han desarrollado simuladores circuitales de alta frecuencia especializados en optimización numérica de aplicaciones específicas [43].

CAD ELECTROMAGNÉTICO

Los métodos de mayor trascendencia en el área del electromagnetismo numérico o computacional fueron propuestos a finales de los sesentas y principios de los setentas: el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo [44], el Método de Momentos [45], el Método del Elemento Finito [46], y el Método de la Matriz de Líneas de Transmisión [47]. Estos métodos permiten simular circuitos a nivel físico, sin tener que hacer aproximaciones quasi-estáticas, lo cual permite obtener una gran precisión en circuitos que trabajan a muy alta frecuencia. Sin embargo, todos estos métodos tienen la característica de consumir grandes cantidades de recursos computacionales (memoria y tiempo de procesamiento). Lo anterior impidió que dichos métodos se pudieran implementar en herramientas de cómputo comercialmente accesibles durante los setentas, retrasando su introducción hasta finales de los años ochenta, cuando aparecieron estaciones de trabajo de alto rendimiento y costo relativamente accesible.

La mayoría de los paquetes comerciales de simulación electromagnética de onda completa están basados en alguno de los cuatro métodos fundamentales anteriormente mencionados. La arena de los simuladores electromagnéticos evolucionó en cuatro diferentes clases: bidimensionales, tridimensionales planares (lateralmente abiertos y de caja cerrada) y tridimensionales de geometría arbitraria. Una excelente

revisión de las herramientas CAD de simulación electromagnética disponibles comercialmente puede consultarse en [48-51].

NUEVAS TENDENCIAS

Las necesidades de la industria militar y de las telecomunicaciones (microondas, electrónica de radio frecuencia e inalámbrica) moldeó significativamente la evolución de las herramientas de CAD para el diseño electromagnético y circuital en alta frecuencia. Estructuras microonda trabajando a frecuencias cada vez más altas han hecho que los modelos clásicos sean cada vez menos confiables para predecir el comportamiento de los componentes manufacturados. Tecnologías como las guías de onda coplanares (CPW), guías de onda embebidas en substratos (SIW), empaquetados de alta velocidad, las antenas en circuitos integrados y en circuitos impresos, etc., han presionado hacia el desarrollo de modelos basados en electromagnetismo de onda completa. Especificaciones de diseño sumamente demandantes, combinadas con la necesidad de acortar los tiempos de desarrollo, han demandado también el desarrollo de sofisticados algoritmos de diseño basados en métodos de optimización.

Por otro lado, el rápido crecimiento de la industria de las telecomunicaciones y de las computadoras de alta velocidad está empujando hacia una mayor integración entre las anteriores arenas de CAD. El diseño electrónico asistido por la computadora está demandando de una metodología más holística, debido al hecho de que las velocidades de conmutación de la circuitería digital está ahora en el rango de las microondas, y a que los módulos de radio frecuencia ahora forman parte integral de algunos sistemas digitales sobre un mismo circuito integrado, sobre un mismo paquete, o sobre un mismo circuito impreso. Adicionalmente, las consideraciones térmicas y mecánicas están impactando cada vez más el proceso de diseño, presionando aún más hacia un diseño electrónico automatizado más multidisciplinar e interrelacionado. Lo anterior está dando lugar al desarrollo de métodos de simulación multi-físico, en los que diferentes dominios del comportamiento físico de una estructura (comportamiento electromagnético, mecánico, térmico, etc.), son analizados utilizando ecuaciones diferenciales parciales acopladas entre los diferentes dominios. Esta es un área emergente del CAD con gran potencial de desarrollo [52,53].

En 1993 surgió una metodología que se ha ido consolidando en la arena de CAD, especialmente para aplicaciones en alta frecuencia: la utilización de las redes neuronales artificiales (RNA) para el modelado y diseño de circuitos en alta frecuencia [54-55]. Por otro lado, y de manera independiente, el Mapeo Espacial surgió en 1994 como una técnica innovadora para el diseño automatizado de circuitos microonda que combina la exactitud de los simuladores electromagnéticos con la velocidad de los simuladores circuitales [56]. Estas dos tecnologías (el mapeo espacial y las redes neurales) ha sido posible combinarlas en un conjunto de métodos aplicables al modelado y diseño de circuitos microonda [57].

A la fecha se han desarrollado una gran cantidad de técnicas basadas en el mapeo espacial, tanto para el modelado como para el diseño de circuitos de RF y microonda, y se han comenzado a reportar trabajos de aplicación a otros campos de la ingeniería (por ejemplo, en ingeniería civil). Revisiones exhaustivas de las diferentes variantes del mapeo espacial y sus aplicaciones puede encontrarse en [58-60].

Por otro lado, una revisión exhaustiva de las aplicaciones de las RNAs para el diseño de circuitos en alta frecuencia (componentes microonda, dispositivos semiconductores de alta velocidad, antenas, etc.), se encuentra en [61]. Ahí se revisan técnicas de diseño basadas tanto en simuladores electromagnéticos como en mediciones de laboratorio, en las que las RNAs se combinan con otras tecnologías.

Existe un campo fértil de investigación en el desarrollo de métodos y técnicas novedosas para el modelado, diseño y optimización de circuitos y dispositivos electrónicos empleando simuladores muy precisos pero computacionalmente intensivos [62-64]. Lo anterior ha sido reconocido aún por los propios desarrolladores de simuladores electromagnéticos [65]. Ejemplos locales se encuentran en [66-70], siendo posible aplicar técnicas de CAD similares en problemas que requieren de mediciones intensivas [71,72].

REFERENCIAS

- [1] S. W. Director, *Computer-Aided Circuit Design, Simulation and Optimization: Benchmark Papers in Electrical Engineering and Computer Science*, Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross, 1973.
- [2] M. R. Aaron, "The use of least squares in system design," *IRE Trans. Circuit Theory*, vol. 3, pp. 224-231, 1956.
- [3] C. A. Desoer and S. K. Mitra, "Design of lossy ladder filters by digital computer," *IRE Trans. Circuit Theory*, vol. 8, pp. 192-201, 1961.
- [4] D. A. Calahan, "Computer design of linear frequency selective networks," *Proc. IEEE*, vol. 53, pp. 1701-1706, 1965.
- [5] B. R. Smith and G. C. Temes, "An interactive approximation procedure for automatic filter synthesis," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 12, pp. 107-112, 1965.
- [6] F. H. Branin, "DC and transient analysis of networks using a digital computer," *IRE Intern. Conv. Rec.*, pp. 236-256, 1962.
- [7] C. Pottle, "Comprehensive active network analysis by digital computer: a state-space approach," *Proc. Third Ann. Allerton Conf. Circuits and System Theory*, pp. 659-668, 1965.
- [8] IBM, "1620 electronic circuit analysis program [ECAP] [1620-EE-02X] user's manual," *IBM Application Program File H20-0170-1*, 1965.
- [9] J. Katzenelson, "AEDNET: a simulator for nonlinear networks," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 1536-1552, 1966.
- [10] S. W. Director and R. A. Rohrer, "The generalized adjoint network and network sensitivities," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 16, num. 3, pp. 318-323, Aug. 1969.
- [11] G. D. Hachtel, R. K. Brayton, and F. G. Gustavson, "The sparse tableau approach to network analysis and design," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-18, pp. 101-113, Jan. 1971.
- [12] C. W. Ho, A. E. Ruehli, and P. A. Brennan, "The modified nodal approach to network analysis," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 22, num. 6, pp. 504-509, Jun. 1975.
- [13] F. H. Branin, G. R. Hogsett, R. L. Lunde and L. E. Kugel, "ECAP II – a new electronic circuit analysis program," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 6, pp. 146-166, 1971.
- [14] T. E. Idleman, F. S. Jenkins, W. J. McCalla and D. O. Pederson, "SLIC – A simulator for linear integrated circuits," *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. SC-6, pp. 188-204, Aug. 1971.
- [15] L. W. Nagel and R. Rohrer, "Computer analysis of nonlinear circuits, excluding radiation (CANCER)," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 6, pp. 166-182, 1971.
- [16] L. W. Nagel and D. O. Pederson, "Simulation program with integrated circuit emphasis," in *Proc. 16th Midwest Symp. Circ. Theory*, Waterloo, Canada, Apr. 1973.
- [17] L. W. Nagel, "SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits," *Univ. of California, Berkley, ERL Memo UCB/ERL M75/520*, May 1975.
- [18] E. Cohen, "Program reference for SPICE2," *Univ. of California, Berkley, ERL Memo ERL- M592*, June 1976.
- [19] P. W. Tuinenga, *SPICE: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using Pspice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
- [20] D. O. Pederson, "A historical review of circuit simulation," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-31, pp. 103-111, Jan. 1984.
- [21] A. R. Newton, "Simulation of large-scale integrated circuits," *Univ. of California, Berkley, ERL Memo ERL-M78/52*, July 1978.
- [22] A. R. Newton, "Techniques for the simulation of large-scale integrated circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-26, pp. 741-749, Sept. 1979.
- [23] H. DeMan *et. al.*, "DIANA: Mixed mode simulator with a hardware description language for hierarchical design of VLSI," *IEEE ICC'80 Conf. Proc.*, Rye, NY, pp. 356-360, Oct. 1980.
- [24] B. Martin, "Electronic design automation: analysis and forecast," *IEEE Spectrum*, vol. 36, pp. 57-61, 1999.
- [25] L. Geppert, "Electronic design automation," *IEEE Spectrum*, vol. 37, pp. 70-74, 2000.
- [26] R. Camposano and M. Pedram, "Electronic design automation at the turn of the century: accomplishments and vision of the future," *IEEE Trans. Computer-Aided Design of I.C. Syst.*, vol. 19, pp. 1401-1403, 2000.
- [27] V. Rajagopalan, *Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems*. New York, NY: Marcel Dekker, 1987.

- [28] O. W. Anderson, *PECAN: Power Electronic Circuit Analysis Program*, EFI TR. 2320, Norwegian Technical Institute, Trondheim, Norway, 1978.
- [29] V. Rajagopalan and K. Sankara-Rao, *ATOSEC User's Manual*, Department of Engineering, University of Quebec, Quebec, Canada, 1984.
- [30] SABER Reference Manual, Analogy Inc., Beaverton, OR, 1996.
- [31] M. B. Patil, S. P. Das, A. Joshi, and M. Chandorkar, "A new public domain simulator for power electronic circuits," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 45, pp. 79-85, Feb. 2002.
- [32] E. M. Baily, *Steady State Harmonic Analysis of Nonlinear Networks*, Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, 1968.
- [33] S. A. Maas, *Nonlinear Microwave and RF Circuits*, Norwood, MA: Artech House, 2003.
- [34] Touchstone, EEsof Inc., Westlake Village, CA, now Agilent EEsof EDA, 1400 Fountaingrove Parkway, Santa Rosa, CA 95403-1799, 1985.
- [35] Super-Compact, formerly Compact Software, Communications Consulting Corp., Upper Saddle River, NJ, now Ansoft, 201 McLean Blvd, Paterson, NJ 07504, 1986.
- [36] OSA90 Version 1.0, Optimization Systems Associates Inc., P.O. Box 8083, Dundas, Ontario, Canada L9H 5E7, 1990.
- [37] C. E. Christoffersen, U. A. Mughal and M. B. Steer, "Object oriented microwave circuit simulation," *Int. J. RF and Microwave CAE*, vol. 10, pp. 164-182, 2000.
- [38] <http://www.ansys.com/>
- [39] S. Aaltonen, "RF design with APLAC," in *IEE Colloquium on Effective Microwave CAD* (Ref. No: 1997/377), London UK, Dec. 1997, pp. 12/1-12/6.
- [40] <http://www.awrcorp.com/products/innovative-technologies/aplac>
- [41] <http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?nid=-34346.0&cc=MX&lc=eng>
- [42] <http://qucs.sourceforge.net/index.html>
- [43] Optenni Lab; Optenni Ltd, Tekniikantie 14, 02150 Espoo, Finland, <https://www.optenni.com/>
- [44] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, 1966.
- [45] R. F. Harrington, "Matrix methods for field problems," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 2, pp. 136-149, Feb. 1967.
- [46] P. Silvester, "A general high-order finite-element waveguide analysis program," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 17, no. 4, pp. 204-210, Apr. 1969.
- [47] S. Akhtarzad and P.B. Johns, "Transmission-line matrix solution of waveguides with wall losses," *Elec. Lett.*, vol. 9, pp. 335-336, 1973.
- [48] D. G. Swanson, "Simulating EM fields," *IEEE Spectrum*, vol. 28, pp. 34-37, 1991.
- [49] D. G. Swanson, *EM Field Simulators Made Practical*. Lowell, MA: Corporate R&D Group, M/A-COM Division of AMP, 1998.
- [50] M. S. Mirotznik and D. Prather, "How to choose EM software," *IEEE Spectrum*, vol. 34, pp. 53-58, 1997.
- [51] W. J. M. Dunn, "Where did EM simulation tools go?: a comparison of how EM tools were used in circuit simulators 25 years ago to today," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 65-69, Jan.-Feb. 2014.
- [52] J. Parry, C. Bailey and C. Aldham, "Multiphysics modelling for electronics design," in *The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM 2000)*, Las Vegas, NV, May 2000, vol. 2, pp. 86-93.
- [53] COMSOL, "Managers's guide to productivity gains with multiphysics simulation," *NASA Tech Briefs*, pp. 1-9, Nov. 2009.
- [54] K. C. Gupta, "Emerging trends in millimeter-wave CAD," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 747-755, 1998.
- [55] Q. J. Zhang and K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*. Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [56] J. W. Bandler, R. M. Biernacki, S. H. Chen, P. A. Grobelny and R. H. Hemmers, "Space mapping technique for electromagnetic optimization," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 2536-2544, 1994.
- [57] J. E. Rayas-Sánchez, *Neural Space Mapping Methods for Modeling and Design of Microwave Circuits*, Ph.D. Thesis (Supervisor: J.W. Bandler), Department of Electrical and Computer Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, 2001.
- [58] J. W. Bandler, Q. Cheng, S. A. Dakroury, A. S. Mohamed, M. H. Bakr, K. Madsen and J. Søndergaard, "Space mapping: the state of the art," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, pp. 337-361, Jan. 2004.
- [59] S. Koziel, Q. S. Cheng and J. W. Bandler, "Space mapping," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 9, pp. 105-

- 122, Dec. 2008.
- [60] J. E. Rayas-Sánchez, “Power in simplicity with ASM: tracing the aggressive space mapping algorithm over two decades of development and engineering applications,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 64-76, Apr. 2016.
 - [61] J. E. Rayas-Sánchez, “EM-based optimization of microwave circuits using artificial neural networks: the state of the art,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, pp. 420-435, Jan. 2004.
 - [62] S. Koziel and L. Leifsson, Ed., *Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering*, New York, NY: Springer, 2013.
 - [63] M. B. Yelten, T. Zhu, S. Koziel, P. D. Franzon, and M. B. Steer, “Demystifying surrogate modeling for circuits and systems,” in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 45-63, Firstquarter 2012.
 - [64] S. Koziel, X-S Yang, and Q. J. Zhang, Ed., *Simulation-Driven Design Optimization and Modeling for Microwave Engineering*, London, England: Imperial College Press, 2013.
 - [65] J. C. Rautio, “Planar electromagnetic analysis,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 35-41, March 2003.
 - [66] J. E. Rayas-Sánchez, F. Lara-Rojo and E. Martínez-Guerrero, “A linear inverse space mapping (LISM) algorithm to design linear and nonlinear RF and microwave circuits,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, pp. 960-968, March 2005.
 - [67] J. E. Rayas-Sánchez and V. Gutiérrez-Ayala, “EM-based Monte Carlo analysis and yield prediction of microwave circuits using linear-input neural-output space mapping,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, pp. 4528-4537, Dec. 2006.
 - [68] V. Gutiérrez-Ayala and J. E. Rayas-Sánchez, “Neural input space mapping optimization based on nonlinear two-layer perceptrons with optimized nonlinearity,” *Int. J. RF and Microwave CAE*, vol. 20, pp. 512-526, Sep. 2010.
 - [69] J. C. Cervantes-González, J. E. Rayas-Sánchez, C. A. López, J. R. Camacho-Pérez, Z. Brito-Brito, and J. L. Chavez-Hurtado, “Space mapping optimization of handset antennas considering EM effects of mobile phone components and human body,” *Int. J. RF and Microwave CAE*, vol. 26, no. 2, pp. 121-128, Feb. 2016.
 - [70] J. L. Chavez-Hurtado and J. E. Rayas-Sánchez, “Polynomial-based surrogate modeling of RF and microwave circuits in frequency domain exploiting the multinomial theorem,” *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 64, no. 12, pp. 4371-4381, Dec. 2016.
 - [71] F. E. Rangel-Patiño, J. L. Chávez-Hurtado, A. Viveros-Wacher, J. E. Rayas-Sánchez, and N. Hakim, “System margining surrogate-based optimization in post-silicon validation,” *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 65, no. 9, pp. 3109-3115, Sep. 2017.
 - [72] F. E. Rangel-Patiño, J. E. Rayas-Sánchez, A. Viveros-Wacher, J. L. Chávez-Hurtado, E. A. Vega-Ochoa, and N. Hakim, “Post-silicon receiver equalization metamodeling by artificial neural networks,” *IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 38, no. 4, pp. 733-740, Apr. 2019.