

A Review of Real Time Digital Simulations: Theory and Applications for the Energy Transition

Luis F. Gaitán-Cubides, *Student Member, IEEE*, Jorge W. González-Sánchez, *Senior Member, IEEE* and Luis A. Giraldo-Velásquez, *Senior Member, IEEE*

Abstract— The arrival of the energy transition to the global electricity scene has led to the implementation of new technologies in power systems and modified the way that the energy is generated, distributed and consumed. The analysis of the operation and the consequences of the inclusion of new technologies become a very important topic in the studies carried out by the utilities. Real-Time Digital Simulators (RTDS) have become a powerful modeling tool that allow to analyze power system models with a high level of fidelity, permitting to anticipate problems and the assessment of solution strategies. Due to the increase in the use of this technology and considering that there are no review articles on RTDS applications written in Spanish, this paper presents an explanation of the characteristics of RTDS along with an updated state of the art related to applications in Energy Transition as a theoretical framework with a large amount of information collected for future researches in Latin America.

Index Terms— Digital Real Time Simulation, Power Hardware-in-the loop, Energy Transition.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio de paradigma de los sistemas de potencia impone desafíos emergentes para el diseño, planificación y operación del sistema eléctrico [1]. La transición energética ha motivado a investigadores y miembros de la industria a implementar nuevas tecnologías en los sistemas de potencia y este cambio también se ha reflejado en los métodos de modelado y simulación utilizados para el análisis de los sistemas de potencia [2].

En el área de la ingeniería eléctrica, la simulación de un sistema de potencia es una técnica computacional y numérica que permite describir tanto el comportamiento dinámico como el comportamiento en estado estable del modelo de una red eléctrica [3]. La simulación digital en tiempo real (DRTS por sus siglas en inglés), es la reproducción de las formas de onda tanto de voltaje como de corriente, con alta precisión, que representan el comportamiento real de un sistema de potencia en un tiempo de simulación igual al tiempo en el que ocurriría el fenómeno simulado en la vida real [4][5]. De esta manera, la DRTS es un método de simulación altamente confiable que se basa principalmente en la simulación transitoria electromagnética de sistemas complejos que comprenden muchos dominios, donde en los últimos años este tipo de tecnología de simulación ha experimentado un fuerte crecimiento para hacer que estos simuladores sean aplicados en todos los sectores [6] [7].

L. F. Gaitán-Cubides. Ingeniería Especializada IEB S.A. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, e-mail: luis.f.g@ieec.org

J. W. González-Sánchez. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, e-mail: jorgew.gonzalez@upb.edu.co

L. A. Giraldo-Velásquez. Ingeniería Especializada IEB S.A. Medellín, Colombia, e-mail: luis.giraldo@ieb.co

Así pues, con la idea de realizar un aporte divulgativo en idioma castellano, este trabajo presenta en la Sección II un resumen con la clasificación, métodos de solución, capacidad de simulación y muestreo de las DRTS. En la Sección III se expone la metodología para la búsqueda de los trabajos de aplicación de esta tecnología en los temas afines a la transición energética añadiendo nuevos ítems a la clasificación realizada por [8]. Por último, en la sección IV y V se presenta el análisis, discusión, nuevas perspectivas y conclusiones sobre la revisión realizada.

II. SIMULACIÓN DIGITAL EN TIEMPO REAL

Debido a la evolución de la potencia informática de los DRTS en los últimos años, actualmente se está en la capacidad de abordar nuevas clases de aplicaciones y campos de práctica ampliados con la simulación de tiempo real (RT). Este aumento en el poder de cómputo implica que los modelos se pueden construir con mayor precisión y el sistema de simulación se acerca a la realidad [8].

La Fig. 1 a) ejemplifica una simulación “*offline acelerada*” donde el tiempo de cálculo es más corto que un paso de tiempo fijo determinado. Así mismo, la Fig. 1 b) muestra otro tipo de simulación “*offline*”, donde el tiempo de cálculo es más largo. En ambos casos, el momento donde un resultado determinado, esté disponible es irrelevante.

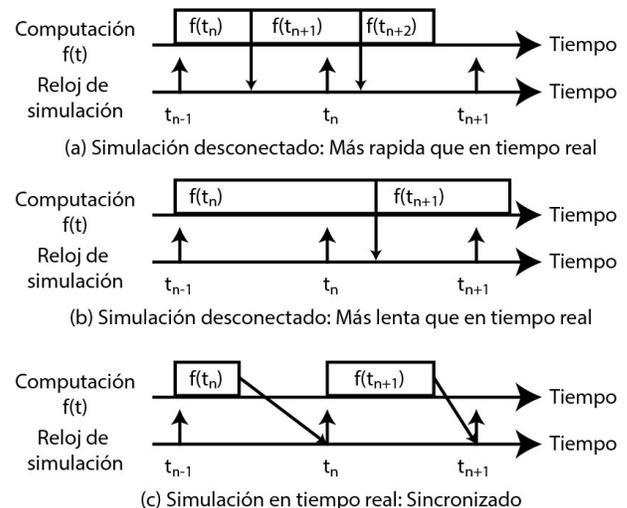


Fig. 1. Requisitos de simulación en tiempo real y otras técnicas de simulación. Adaptado de [5].

De igual manera, tanto la Fig. 1 a) como la Fig. 1 b), muestran como durante una simulación “*offline*” en tiempo discreto, la cantidad de tiempo real requerida para calcular todas las ecuaciones y funciones que representan un sistema durante un paso de tiempo determinado puede ser más corta o más larga

que la duración del paso de tiempo de la simulación [5]. Normalmente, cuando se realiza una simulación “offline”, el objetivo es obtener resultados lo más rápido posible y la velocidad de resolución del sistema depende de la potencia de cálculo disponible y de la complejidad del modelo matemático del sistema.

La Fig. 1 c) muestra que una simulación en tiempo real es válida cuando el simulador reproduce con precisión las variables internas y las salidas de la simulación dentro del mismo período de tiempo en el que lo harían los elementos del sistema de su contraparte física [5]. Para lograr tal objetivo, un DRTS necesita resolver las ecuaciones del modelo para un paso de tiempo determinado dentro del mismo tiempo del reloj del hardware que lo procesa [9]. El uso de herramientas de simulación en tiempo real se ha extendido y ha experimentado un fuerte crecimiento [6]. Cuando se realiza esta clase de simulación, es necesario poder validar los resultados, ya sea por comparaciones de modelos teóricos exactos o por modelos implementados de manera real, de modo que los datos obtenidos sean los esperados y puedan ser predecibles [3].

A. Clasificación

La clasificación de los DRTS obedece a si existe una comunicación con elementos externos al dispositivo. Si el DRTS no tiene conexión con ningún tipo de elemento externo, este se denomina como un *Sistema Totalmente Simulado Digitalmente*, por otra parte, si hay conexión con otros dispositivos, se denomina un sistema *Hardware-in-the loop (HIL)*.

Sistemas Totalmente Simulados Digitalmente

En esta clasificación, además de los diferentes componentes de la red bajo estudio, todos los modelos de control, protección y demás sistemas están enteramente simulados y no tienen comunicación con el exterior, pero sí permite comunicación bidireccional entre diferentes softwares y la simulación puede ser más lenta o más rápida que en tiempo real [10]. Este tipo de simulación requiere plataformas con librerías muy detalladas, donde se encuentren modelados todos los componentes que son de interés para los estudios a realizar. Se debe tener en cuenta que muchos de estos modelos, algunas veces, no son tan minuciosos en sus componentes y usan simplificaciones que pueden afectar la exactitud que se busca en la simulación [6] [8]. Ejemplos y otras denominaciones para esta clasificación son *Model-In-The-Loop (MIL)*, *Processor-In-The-Loop (PIL)* ó el más común que es *Software-In-The-Loop (SIL)* [9].

Sistemas Hardware-in-the loop (HIL)

Esta simulación utiliza diferentes unidades de hardware interconectadas con el fin de realizar simulación en paralelo de distintas divisiones de un mismo modelo [11]. Se establece una conexión física del hardware con componentes físicos reales, a los que se les suele denominar como *Hardware Under Test (HuT)* [9]. Estos sistemas requieren, por lo tanto, de la adecuada interfaz de comunicación con estos dispositivos, presentando una ventaja principal respecto a los Sistemas Totalmente Simulados Digitalmente y es que, permiten utilizar modelos reales, evitando realizar simplificaciones al modelo [6]. Este

mismo autor menciona que los sistemas SIL tienen menores tiempos de simulación que los sistemas HIL, debido a que la simulación SIL no presenta conexiones físicas con otros dispositivos, lo que puede representar una ventaja ya que permite realizar una mayor cantidad de cálculos en un menor tiempo. Los desafíos para la simulación en HIL de micro-redes son similares a los desafíos que presentan los sistemas de distribución y los sistemas de inercia finita, estos últimos representados por los *Sistemas de Energía Integrados a Bordo*, denominados IPS, (sistemas de movilidad marítima). Estos incluyen tanto longitudes de cable cortas, gran número de dispositivos electrónicos de potencia como falta de flexibilidad y escalabilidad [12]. Los sistemas HIL se dividen también en dos grupos, de acuerdo con los equipos con los que se conectan.

Sistemas CHIL – Control Hardware-in-the loop (CHIL)

El término *CHIL* define a un sistema *HIL* que incluye en la simulación un sistema de control real que interactúa con el sistema modelado, sin que se genere intercambio de señales de potencia [6]. Un uso común de este método es el diseño de prototipos de controladores, ya que el controlador toma las señales generadas por el simulador y las procesa para generar las señales de control que luego van de nuevo a la simulación [9].

Sistemas PHIL – Power Hardware-in-the loop (PHIL)

Este término hace referencia a un sistema *HIL* que implica transferencia de señales de potencia desde o hacia el *HuT*. En una simulación *PHIL*, las señales son generadas desde la interfaz que contiene el modelo y son enviadas hacia un sistema de amplificación que adecúa la señal que llegará al dispositivo de interés (fuente o carga), el dispositivo exterior actúa en función de la señal y devuelve la respuesta a la simulación, cerrando el lazo [6] [9] [13].

Mediante la generación y recepción de señales y la interacción con los dispositivos que se desean evaluar/analizar con el modelo, es posible el uso conjunto tanto de las DRTS como del hardware especializado, con la finalidad de que no sea necesario tener la planta física real para poder evaluar la operación del hardware [14] [15].

Ejemplos de aplicación del *PHIL* podrían ser la prueba en tiempo real de máquinas, convertidores, limitadores de corriente de falla o cualquier otro dispositivo eléctrico. Por otra parte, la prueba de dispositivos de protección, como relés, puede requerir amplificadores de voltaje o corriente para pruebas basadas en *HIL*; sin embargo, el uso del amplificador es principalmente para que el dispositivo detecte el voltaje real y/o las señales de corriente [9]. En la Fig. 2 se observa la interacción entre dispositivos tanto en una simulación *CHIL* y como en una *PHIL*.

Dentro del campo de las simulaciones *PHIL-RT*, en [16] se menciona que las cuatro marcas principales de simuladores usadas para investigaciones y desarrollos en el campo de las DRTS son: *OPAL-RT*, *RTDS*, *VTB*, *Hypersim*. Por otra parte, [9] menciona otras marcas para el desarrollo de DRTS como lo son: *dSPACE*, *xPC Target*, *rtX*, y *Thyphoon*, este último de amplio reconocimiento en simulaciones *CHIL*.

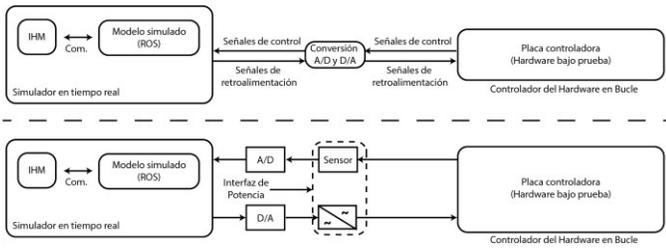


Fig. 2. Concepto básico de simulación HIL para CHIL (arriba) y PHIL (abajo). Adaptado de [9].

B. Métodos De Solución

Los DRTS disponibles en el mercado emplean distintos métodos para la resolución de sus respectivos modelos matemáticos. Estos métodos son conocidos comúnmente como *solvers* y existen tres tipos: Electromagnetic Transients (EMT), Solución Fasorial y el Híbrido.

Electromagnetic Transients (EMT)

El método más ampliamente utilizado en este tipo, consiste en discretizar ondas continuas mediante la regla trapezoidal, con lo que se obtiene modelar toda la red con elementos algebraicos. De esta manera, sólo se requiere para resolver el sistema en un momento determinado $x(t)$, el estado de las variables en ese instante y ciertos estados anteriores a x , de manera que la red queda modelada como un conjunto de conductancias y fuentes de corriente [6].

El método de la regla trapezoidal, se puede usar en un algoritmo generalizado capaz de resolver transitorios en cualquier red con parámetros distribuidos y agrupados. En [17] señalan que en el aspecto estrictamente numérico, esto conduce a la solución de un sistema de ecuaciones lineales (nodales) en cada paso de tiempo a través de un método eficiente y capaz de manejar simulaciones de redes grandes. Este método se convirtió en una estrategia pionera en el campo del modelado digital de sistemas de potencia y permitió el surgimiento de diferentes técnicas para el modelado de componentes de la red eléctrica, su funcionamiento y fenómenos asociados [18] [19] [20] [21]. Actualmente, es el método usado en simulaciones de fenómenos de alta frecuencia (kHz – MHz), en los que se requieren pasos de simulación del orden de microsegundos [6]. De igual manera, en el *ElectroMagnetic Transients Program (EMTP)*, además del método de la regla trapezoidal se emplea también el modelamiento de las ecuaciones diferenciales de cada componente, posteriormente se discretizan por separado y luego el modelo general del sistema se obtiene mediante análisis nodal [22]. Otras soluciones propuestas para la simulación de sistemas HVDC y generación basada en inversores, son generalmente conocidas como técnicas de compensación de tiempo discreto e involucran algoritmos de interpolación y sellado de tiempo (*time-stamping*) [5].

Solución Fasorial

Este método simula todo el sistema de potencia en el dominio de la frecuencia, por tanto la dinámica del modelo sólo dependerá de las máquinas rotativas y sus sistemas de control [6]. OPAL RT desarrolló un método de solución fasorial de enfoque particionado en combinación con el método

modificado de integración de Euler y los métodos de matriz dispersa para factorizar y resolver ecuaciones nodales de red [23]. La simulación fasorial se utiliza principalmente para investigar las oscilaciones electromecánicas de los sistemas de potencia [24]. De igual manera, estudios recientes demuestran la capacidad de integrar este método de solución en simulaciones *PHIL* para desarrollar simulaciones *Phasor Power Hardware-in-the loop (PPHIL)* [25]. En [23] se identificaron los desafíos al momento de implementar este tipo de solución: Patrón de datos fusionados, Patrón de memoria contigua y Pre-cálculos.

En el caso del patrón de datos fusionados se debe tener un espacio para guardar sólo las variables y parámetros que son estrictamente necesarios durante el tiempo de ejecución, minimizando la cantidad de accesos a la memoria.

Por otra parte, en el patrón de memoria contigua se debe tener especial atención en el almacenamiento de algunos resultados que genera la simulación y que posteriormente deben ser usados para actualizar el cálculo. Por ejemplo, el orden de las actualizaciones de los componentes que tienen variables de estado es importante en la simulación de estabilidad transitoria.

Por último, los pre-cálculos se refieren a aquellos escenarios de simulación donde se presenten eventos que causan cambios en la topología del sistema, los cuales se pre-calculan y se almacenan antes de comenzar la simulación en tiempo real.

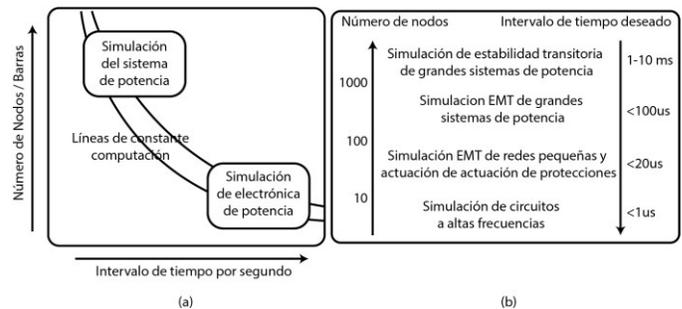


Fig. 3. (a) Relación entre el número de nodos y el tiempo de muestreo y (b) recomendaciones de muestreo para el análisis de diferentes fenómenos eléctricos. Adaptado de [9].

Por otra parte, los fasores dinámicos son conocidos como una herramienta analítica poderosa y eficiente utilizada en simulaciones, que se basa en el concepto de coeficientes de Fourier variables en el tiempo [26]. Los fasores dinámicos se proponen como solución para resolver uno de los principales problemas de la simulación distribuida en tiempo real, el gran tiempo de envío y procesamiento de información entre los simuladores, que determina el paso de tiempo mínimo si los dispositivos deben intercambiar datos para cada paso [27] [28].

Híbrido

El método híbrido fue desarrollado por Heffernan en [29] y [30] como una estrategia para encontrar una solución al problema de la fidelidad de las simulaciones de enlaces de HVDC, ya que la simulación Cuasi-Estática no era adecuada para este tipo de modelamiento. Este método combinaba la eficiencia de la resolución fasorial y la precisión de la simulación EMT. En la Fig. 4, se observa cómo este método permite interacción de estas estrategias por medio de la conversión de datos, lo que permite el análisis de fenómenos de

el mundo. Por otra parte, en [47] abordan las estrategias utilizadas para las DRTS de sistemas con electrónica de potencia donde el ancho de banda, la estabilidad del sistema, las limitaciones de las interfaces de comunicación y energía son los retos más grandes al momento de garantizar la fidelidad de la simulación.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las primeras investigaciones sobre RTDS se remontan a principios de la década de 1990 con aplicaciones de pruebas a relés y en pruebas a sistemas de control [48] [49]. En [9] señalan las siguientes características en común en los DRTS:

1. Múltiples procesadores que operan en paralelo para formar la plataforma objetivo en la que se ejecuta la simulación en tiempo real
2. Utilizan una computadora *host* para preparar el modelo fuera de línea para luego compilarlo y cargarlo en la plataforma de destino. Las computadoras *host* también se utilizan para monitorear los resultados de la simulación
3. Terminales de I/O para interactuar con hardware externo
4. Una red de comunicación para intercambiar datos entre múltiples plataformas objetivos cuando el modelo se divide en múltiples subsistemas.

Basados en lo expuesto por [50], para realizar la revisión bibliográfica, se analizaron los siguientes tópicos:

A. Bases de Datos

Se seleccionaron los artículos publicados en tres bases de datos, considerando artículos en idioma inglés y español. Las bases seleccionadas son: IEEE Xplore Digital Library, Scopus/Science Direct y SciELO.

B. Selección de Palabras y Trabajos a Analizar

Se realizó la búsqueda de trabajos a partir de las palabras “REAL TIME SIMULATION”, ya que, si se utilizaba el término “DIGITAL REAL TIME SIMULATION”, las bases de datos excluían muchos trabajos debido a que los autores no incluían el término “DIGITAL” en los metadatos de las publicaciones. Por lo anterior se encontró un gran número de trabajos, fue necesario refinar la búsqueda, identificando documentos afines a ingeniería y energía, tal como se muestra en la TABLA .

TABLA I
TÉRMINO UTILIZADO PARA REALIZAR LA BÚSQUEDA Y CANTIDAD DE TRABAJOS

Término usado	Base de Datos	Número de Trabajos
REAL TIME SIMULATION	SCOPUS	906740
	XPLORE	65374
	SciELO	129
ALL (“REAL TIME SIMULATION”)	SCOPUS	27672
	XPLORE	35930
Áreas Temáticas (Engineering/Energy/Systems)	SCOPUS	7264
	XPLORE	5026
Idioma (Inglés y Español)		
Año (2000-2021)	SciELO	68

Se observa una gran cantidad de trabajos encontrados en la plataforma SCOPUS, donde el resultado de la búsqueda obtuvo

7264 trabajos. Razón por la cual se debe refinar la búsqueda de acuerdo al tipo de aplicación en específico de la simulación.

C. Vigilancia Tecnológica

Se observó que la plataforma SCOPUS incluía una gran cantidad de resultados que también arrojaba el IEEE Xplore. De esta manera se toman los resultados de SCOPUS como referencia para evidenciar el crecimiento del interés por la publicación, tal como se expone en la Fig. 6, donde se muestra el crecimiento en el número de trabajos presentados por año desde el 2000 hasta el 2021, siendo este último, el año de mayor número de publicaciones con 575. De igual manera se evidencia que China (1469) y Estados Unidos (1410) son los países con mayor cantidad de publicaciones, superando por un numero significativo las investigaciones provenientes de Canadá (635), Alemania (493) e India (440).

D. Resultados de la Revisión

Actualmente, el campo de aplicación de este tipo de simulaciones abarca diferentes temáticas. En [8] se clasificaron las aplicaciones de las simulaciones en tiempo real en sistemas de potencia, agrupándolas en cuatro grupos: *Aplicaciones funcionales*, *Aplicaciones específicas en campo*, *Simulación de alta fidelidad* y *Aplicaciones en múltiples fenómenos físicos*. Cada uno de los temas que abarcan esta división fue considerada en la ecuación de búsqueda usada en las bases de datos consultadas. En la

TABLA se agrupan estos tópicos junto con los trabajos afines a la transición energética que se obtuvieron en la revisión bibliográfica anteriormente descrita.

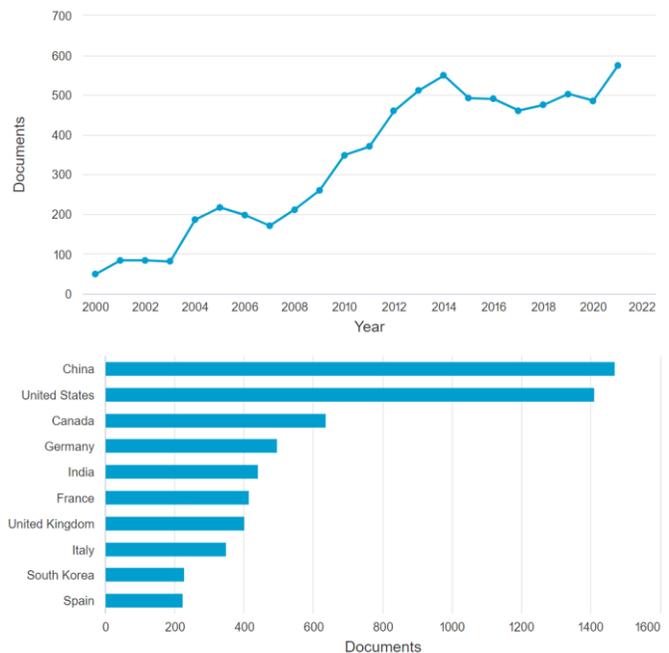


Fig. 6. Número de artículos sobre Simulación en Tiempo Real por año (arriba) y países con mayor cantidad de investigaciones (abajo). Fuente: SCOPUS.

TABLA II
CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE DRTS EN TEMAS AFINES A
LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

1. Aplicaciones funcionales		
1.1.	Diseño y modelado	Modelado de un interruptor para HVDC [51] Modelamiento de fallas internas en generadores síncronos [52] Modelamiento de generadores eólicos [53] Modelamiento de trenes eléctricos [54] Diseño de bancos de pruebas para validación de protecciones eléctricas [55] [56] Modelamiento de sistemas de almacenamiento de energía con baterías [57]
1.2.	Creación rápida de prototipos	Prototipos de controles para motores [58] Prototipado de controladores [59] [60] Pruebas a sistemas de control en redes de distribución [42] Pruebas a sistemas de control HVDC [61][62] Pruebas a sistemas de control y protección [63] [64] [65] [66] [67]
1.3.	Pruebas	Pruebas a controladores digitales [68] Estudios de protecciones adaptativas [69] [70] Metodologías para pruebas <i>end-to-end</i> [71] Validación de subestaciones eléctricas digitales [72]
1.4.	Enseñanza y capacitación	Aplicaciones de electrónica de potencia y sistemas de potencia [73][74] [75] [76]
1.5.	Co-simulación geográficamente distribuida	Co-Simulación entre DRTS ubicados en dos países diferentes [77] [78]. Simulación eléctrica y térmica combinada con dos DRTS en continentes diferentes [79].
2. Aplicaciones específicas en campo		
2.1.	Sistemas de potencia	Estabilidad transitoria en grandes sistemas de potencia [23] Simulación híbrida de sistema trifásico [80] Redes eléctricas con elementos basados en electrónica de potencia [81] Sistemas de monitoreo y control de redes eléctricas [82] Simulación de sistemas de potencia con Generadores Síncronos Virtuales [83] Estudios de armónicos en sistemas industriales [84] [85] Análisis de control de voltaje y plantas de potencia virtual a través de simulaciones SIL en el Sistema Interconectado Colombiano y Ecuatoriano [86] Evaluación de esquemas adaptativos para protecciones de sobre-corriente [87] Evaluación de la operación de la protección diferencial en redes de distribución en DC [88] Sistemas de prueba para esquemas de protecciones [89] [90] Pruebas en protecciones de distancia en superconductores [91] Integración de PMU's [92] [93] Simulación RT de un PMU [94] Evaluación del desempeño de las protecciones en redes HVDC con Simulación RT [95] [96] Técnicas para pruebas de sistemas HVDC de lazo cerrado en DRTS [97] Sistemas <i>HVDC-VSC</i> Multiterminal [98] Técnica para corregir el "delay" en una simulación-RT de redes HVDC [99] Diseño de un emulador de una línea de transmisión HVDC con DRTS [100] Simulación de FACTS en sistemas HVDC [101] [102] [103] [104] Evaluación de técnicas de modelamiento de FACTS [105] [106]
2.1.1.	Protección y PMU	
2.1.2.	Pruebas de sistemas HVDC	
2.1.3.	Pruebas de FACTS y D-FACTS	
2.1.4.	Análisis de sistemas de distribución/aplicaciones de Smart Grids	Análisis del comportamiento de Smart Grids [37][107][108][109][110][111][112] Interoperabilidad entre Smart Grids [113] Análisis de potencia reactiva en Smart Grids usando el protocolo IEC 61850 [114] Análisis y pruebas del desempeño de protecciones en Smart Grids [115] Simulación híbrida en tiempo real que combina el sistema físico integrado y el simulador digital [116] Análisis de la estrategia del MPPT [117] Co-simulación de sistemas de distribución de media y baja tensión [118] Análisis de la calidad de la energía en la interconexión de una micro-red a un sistema de distribución local [119] [120] Control en redes con GD [121] Regulación de voltaje en redes de distribución con generación eólica [122] Simulación de sistema solar fotovoltaico como STATCOM (PV-STATCOM) [123] Modelado, análisis, prueba e integración de sistemas PV en redes eléctricas [124] Simulación del control de voltaje para la carga de vehículos eléctricos (EV) [125] Simulación de sistemas de carga de las baterías en vehículos eléctricos [126][127] Simulación de los sistemas de propulsión de <i>Light Electric Vehicles</i> [128] Diseño y simulación en tiempo real de un cargador de baterías para sistemas de almacenamiento de energía PV [129] Estudios sobre vehículos eléctricos en redes de distribución [130] Simulación y análisis de inversores para una planta PV [131] [132] [133] [134] Análisis del funcionamiento de distintos tipos de convertidores <i>DC-DC</i> mediante <i>Hardware In The Loop</i> [135] Banco de pruebas para analizar el impacto de los eventos cibernéticos en las cargas críticas en una micro-red [39] Arquitectura dual para la verificación del tiempo de ejecución de un sistema Cyberfísico [136] Solución del problema de ruta óptima de energía en grupos de micro-redes en DC [137] Sistema de Monitoreo de una micro-red aislada [138]
2.1.4.1.	Regulación de voltaje con integración de generación distribuida (DG)	
2.1.4.2.	Carga de vehículos eléctricos	
2.1.4.3.	Simulación PHIL del control de potencia activa/reactiva de inversores PV	
2.1.4.4.	Análisis físico/cibernético en tiempo real de Smart Grids	
2.1.4.5.	Operación y control en tiempo real de la micro-red	
2.1.4.6.	Gestión de energía en el hogar	
2.1.5.	Barcos eléctricos	Simulación de una micro-red local con dos subsistemas: doméstico y comunal [139] Co-Simulación de barcos eléctricos [140] Simulación "High-Level Synthesis" del sistema de potencia de un barco eléctrico [141] Modelamiento de la red de comunicaciones y evaluación de los controles del sistema de potencia de un barco eléctrico [142] Evaluación del desempeño de los sistemas de control del sistema eléctrico de aeronaves [143] [144] [145] Simulación PHIL de un generador eléctrico utilizado en los sistemas de potencia en aeronaves [146] Simulación RT para pruebas de sistemas de control y protección de aeronaves [147] Metodología para desarrollar simulaciones en paralelo de sistemas con electrónica de potencia [81]
2.1.6.	Aeronaves	
2.2.	Electrónica de Potencia	Uso FPGA para la simulación RT de convertidores electrónicos de potencia. [148] "Multi-Solver" para la simulación de circuitos que contienen interruptores electrónicos de potencia. [149]

		Método de inserción de latencia para simulación RT de sistemas electrónicos de alta frecuencia de conmutación. [150] Formulación y prueba métodos e interfaces PHIL [151] Filtros activos de potencia para eliminación de contenido armónico [152]
2.2.1.	Convertidor modular multinivel	Simulación de dispositivos <i>System-on-Chip</i> en convertidores modulares multinivel [153] Modelado Fasorial Desplazado (SPM) para simular Convertidor Modular Multinivel [154] Control de componentes de DC para la simulación híbrida digital-física. [155]
2.3.	Sistemas de control y automatización	Control de SisPot con sincrofasores [156] Simulación y control de motores eléctricos [157] [158] [159] Validación de esquemas de automatización de subestaciones [72] [160]
	3. Simulación de alta fidelidad	
3.1.	Alta fidelidad	Modelamiento de motores síncronos [161] Modelo de línea de transmisión dependiente de la frecuencia (FD-LINE) para lograr simulaciones en tiempo real [162] Modelo EMT de un parque eólico conectado a la red [163]
3.2.	Simulación EMT	Interfaz de modelos paramétricos de valor medio de sistemas RLC en simulaciones RT-EMT [164] Simulación de transitorios electromagnéticos en convertidores electrónicos de potencia con alta frecuencia de conmutación. [165] Simulación híbrida de una micro-red para detectar sobre-corriente y sub-tensiones [166] Modelado Fasorial Desplazado (SPM) como técnica para simular Convertidor Modular Multinivel [154]
3.3.	Simulación fasorial	Fasores dinámicos para mejorar la precisión de los resultados de la simulación para grandes pasos de tiempo [26] Simulación Fasorial en simulación MIL [167] Modelo de fasor dinámico aplicado en una simulación de una micro-red de AC/DC [168] Simulación híbrida para analizar una red de distribución con fuentes de generación alternativas [166]
3.4.	Híbridas	Metodología para diseñar una simulador RT con PHIL híbrida en tiempo real [169] Plataforma de simulación en tiempo real de bajo costo para realizar estudios de sistemas de control en entorno HIL [170] Simulación en tiempo real híbrido para el análisis de un generador eólico [171]
	4. Aplicaciones en múltiples fenómenos físicos	
4.1.	Termoeléctricas	Co-simulación termoeléctrica de un barco eléctrico utilizando dos RTDS [172] Simulación en tiempo discreto de eventos conmutación [173] Simulación híbrida de transitorios electromecánicos y electromagnéticos en sistemas de potencia [174] Plataforma de co-simulación para aplicaciones electromecánicas en vehículos [175]
4.2.	Electromecánicas	Simulación híbrida electromecánica-electromagnética de un sistema UHVDC [176] Simulación híbrida transitoria electromagnética y electromecánica para análisis de resonancia sub-sincrónica [177] Simulación HIL para sistemas electromecánicos de gran escala [178]

IV. ANÁLISIS, DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS ACERCA DEL USO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

Como se mencionó anteriormente, tomando como referencia la clasificación de las aplicación de Las Simulaciones en Tiempo Real que realizó [8], se analizaron 136 trabajos afines a la Transición Energética, donde se destacan las *Aplicaciones Específicas De Campo*, como el área con mayor número de investigaciones y desarrollos con un 64% de las publicaciones revisadas, tal como se observa en la Fig. 7. Dentro de esta agrupación las *Aplicaciones en Sistemas de Potencia*, más específicamente, *Análisis de Sistemas de Distribución Y Aplicaciones de Smart Grids*, es la temática con mayor interés. Este resultado coincide con el interés que tienen los operadores de red por modernizar sus sistemas de distribución introduciendo tecnologías de GD en sus redes [179]. Por otro lado, dentro de las *Aplicaciones funcionales*, los trabajos sobre pruebas a sistemas de control y protección es la temática con mayor número de trabajos. Esta temática presenta toda una gama de oportunidades para los operadores de red y consultores, ya que la fidelidad de las simulaciones realizadas en los DRTS sumada con las ventajas de las pruebas PHIL, donde se conectan al simulador relés de protección, permite validar la actuación de diferentes dispositivos de protección ante perturbaciones de la red con un nivel de detalle superior. Este tema, sumado con las *Aplicaciones Específicas De Campo en Protección y PMU*, suman un total del 17%, lo que perfila a las pruebas y validaciones de sistemas de protección en redes eléctricas como una temática de investigación con proyección hacia el futuro. De igual manera, las investigaciones afines a tecnologías HVDC representan un 10% del total de trabajos analizados, donde se presentan investigaciones que usaron las DRTS tanto para diseño, modelado y pruebas de sus componentes, como para el análisis y evaluación de su comportamiento.

Por otra parte, los trabajos afines a *Simulación de alta fidelidad y de Múltiples fenómenos físicos* representan un 15% del total de trabajos analizados. Debido al nivel de detalle de este tipo de investigaciones y a la particularidad de los casos de estudio que son objeto de análisis, este tipo de investigación no presenta un número elevado de trabajos, pero en ellos, se valida la gran capacidad que puede llegar a presentar una DRTS.

De esta manera, la tendencia en los últimos años es el uso de DRTS para simulación PHIL en aplicaciones funcionales y aplicaciones específicas de campo, donde se encuentran los trabajos afines a pruebas de sistemas de control y protección, análisis de *Smart Grids* y sistemas de distribución con presencia de GD. Lo anterior permite ver a las DRTS, no solo como una herramienta de simulación robusta sino como un medio que permite prever con gran detalle el posible comportamiento de los sistemas de potencia, facilita la adopción de nuevas estrategias y la entrada de nuevas tecnologías a los sistemas de potencia a todo nivel.



Fig. 7. Número de publicaciones analizadas de acuerdo a cada aplicación.

V. CONCLUSIONES

Con este trabajo, se ha realizado una revisión en idioma español sobre los Simuladores Digitales en Tiempo Real, abordando su teoría básica, la manera en que se clasifican, sus métodos de solución y los criterios para definir los tiempos de simulación a utilizar de acuerdo al fenómeno que se desea analizar, con la finalidad de ampliar la difusión y generar mayor interés acerca del tema entre la comunidad hispanohablante.

En adición, se propone una clasificación de las aplicaciones de los Simuladores Digitales en Tiempo Real acompañada de la descripción de los trabajos más sobresalientes en cada uno de los tópicos afines a la transición energética que están viviendo los sistemas de potencia en la actualidad.

Este documento presenta un amplio abanico de trabajos vinculados al empleo de DRTS como una herramienta que facilita la adopción de novedosas estrategias y la entrada de nuevas tecnologías a los sistemas de potencia a todo nivel, siendo la principal contribución de este trabajo un análisis que proporciona a los investigadores una síntesis sobre el estado actual en las investigaciones afines a la transición energética, desarrolladas en Simuladores Digitales en Tiempo Real.

Al ser una tecnología adaptada recientemente en Latinoamérica, el uso de estos dispositivos se convierte en un tema de interés por parte de los operadores de red e investigadores ya que el detalle que se puede lograr en sus modelos, acompañado de la gran capacidad de su hardware, velocidad de simulación y la opción de conexión e interacción con equipos reales, permiten obtener estudios con un nivel superior de fidelidad, dando herramientas a los usuarios para identificar y corregir posibles problemas de esquemas y diseño que hayan sido propuestos.

REFERENCIAS

[1] T. Strasserl, "A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2424–2438, 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2361486.

[2] M. Stevic, "Multi-site European framework for real-time co-simulation of power systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 17, pp. 4126–4135, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1576.

[3] N. Achury Beltrán, "Simulación y control de sistemas de potencia mediante el monitoreo del SPI en Real-Time con el uso de sincrofasores," Universidad de Los Andes, 2014.

[4] M. Tostado Véliz, "Técnicas de simulación de estabilidad de tensión en sistemas eléctricos de gran dimensión," Universidad de Sevilla, 2017.

[5] J. N. Bélanger, J. Venne, P., & Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation," *Planet RT*, vol. 1, no. 1, pp. 25–29, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.800-801.489.

[6] M. Tostado Véliz, "Técnicas de simulación de estabilidad de tensión en sistemas eléctricos de gran dimensión," Universidad de Sevilla, 2017.

[7] S. S. Noreen, N. Shamim, V. Roy, and S. B. Bayne, "Real-Time Digital Simulators: A Comprehensive Study on System Overview, Application, and Importance," *Int. J. Res. Eng.*, vol. 4, no. 11, pp. 266–277, 2017, doi: 10.21276/ijre.2017.4.11.3.

[8] X. Guillaud, "Applications of Real-Time Simulation Technologies in Power and Energy Systems," *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 103–115, 2015, doi: 10.1109/jpets.2015.2445296.

[9] M. D. Omar Faruque *et al.*, "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 63–73, 2015, doi: 10.1109/jpets.2015.2427370.

[10] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, and N. K. Kishore, "Modeling and real-time simulation of an AC microgrid with solar photovoltaic system," *2015 Annu. IEEE India Conf.*, 2015, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443619.

[11] R. A. Guasca Baracaldo, "Modelación computacional y simulación real-time de una conexión HVDC con Hardware – In – The Loop," Universidad de Los Andes, 2012.

[12] M. Panwar, B. Lundstrom, J. Langston, S. Suryanarayanan, and S. Chakraborty, "An overview of real time hardware-in-the-loop capabilities in digital simulation for electric microgrids," *45th North Am. Power Symp. NAPS 2013*, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1109/NAPS.2013.6666861.

[13] M. Dargahi, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Studies in power hardware in the loop (PHIL) simulation using real-time digital simulator (RTDS)," *PEDES 2012 - IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst.*, 2012, doi: 10.1109/PEDES.2012.6484500.

[14] S. Mojlish, N. Erdogan, D. Levine, and A. Davoudi, "Review of Hardware Platforms for Real-Time Simulation of Electric Machines," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 3, no. 1, pp. 130–146, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2656141.

[15] S. Goyal, G. Ledwich, and A. Ghosh, "Power network in loop: A paradigm for real-time simulation and hardware testing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 1083–1092, 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034815.

[16] E. Garcia-Martinez, J. F. Sanz, J. Muñoz-Cruzado, and J. M. Perić, "A review of PHIL testing for smart grids—selection guide, classification and online database analysis," *Electron.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/electronics9030382.

[17] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292459.

[18] H. W. Dommel, "Nonlinear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-90, no. 6, pp. 2561–2567, 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.292905.

[19] Dommel, Hermann W and Sato N, "Fast Transient Stability Solutions," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-91, no. 4, pp. 1643–1650, 1972.

[20] H. W. Dommel and W. S. Meyer, "Computation of Electromagnetic Transients," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 983–993, 1974, doi: 10.1109/PROC.1974.9550.

[21] V. Brandwajn, W. S. Meyer, and H. W. Dommel, "Synchronous Machine Initialization for Unbalanced Network Conditions Within an Electromagnetic Transients Program," *IEEE Conf. Proc. Power Ind. Comput. Appl. Conf. 1979. PICA-79*, pp. 38–41, 1979, doi: 10.1109/PICA.1979.720043.

[22] V. Chindu and A. M. Kulkarni, "A Generalised State-Space Approach for Studying EMTF Simulation Models," *2018 20th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/NPSC.2018.8771799.

[23] V. Jalili-Marandi, E. Robert, V. Lapointe, and J. Belanger, "A real-time transient stability simulation tool for large-scale power systems," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344767.

[24] R. Brandl, J. Montoya, T. Degner, and D. Strauss-Mincu, "Power system stability studies including real hardware using phasor power hardware-in-the-loop technology," *Proc. - 2018 IEEE Int. Conf. Ind. Electron. Sustain. Energy Syst. IESES 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 552–559, 2018, doi: 10.1109/IESES.2018.8349937.

[25] G. R. Bharati, S. Chakraborty, C. Duan, and T. Nishikawa, "An integrated transmission-distribution modeling for phasor-domain dynamic analysis in real-time," *2020 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2020*, 2020, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087705.

[26] M. Mirz, A. Estebarsari, F. Arrigo, E. Bompard, and A. Monti, "Dynamic

- phasors to enable distributed real-time simulation,” *2017 6th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2017*, pp. 139–144, 2017, doi: 10.1109/ICCEP.2017.8004805.
- [27] M. Stevic and A. Monti, “A Bilateral Teleoperation Approach for Interface Algorithms in Distributed Real-Time Simulations,” *2018 IEEE Work. Complex. Eng. COMPENG 2018*, 2018, doi: 10.1109/CompEng.2018.8536241.
- [28] J. Montoya, “Advanced laboratory testing methods using real-time simulation and hardware-in-the-loop techniques: A survey of smart grid international research facility network activities,” *Energies*, vol. 13, no. 12, 2020, doi: 10.3390/en13123267.
- [29] M. D. Heffernan, K. S. Turner, J. Arrillaga, and C. P. Arnold, “Computation of a.c.-d.c. system disturbances — Part I. Interactive coordination of generator and convertor transient models,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4341–4348, 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316825.
- [30] K. S. Turner, M. D. Heffernan, C. P. Arnold, and J. Arrillaga, “Computation of a.c.-d.c. system disturbances. Pt. III — Transient stability assessment,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4356–4363, 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316846.
- [31] A. S. Musleh, S. M. Mueyeen, A. Al-Durra, and I. Kamwa, “Testing and validation of wide-area control of STATCOM using real-time digital simulator with hybrid HIL-SIL configuration,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 12, pp. 3039–3049, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1557.
- [32] T. Joseph, K. Jose, C. E. Ugalde-Loo, G. Li, and J. Liang, “Real-time hardware-in-the-loop platform for hybrid AC/DC power system studies,” *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/PTC.2019.8810905.
- [33] L. A. Grégoire, M. Sleiman, H. F. Blanchette, and K. Al-Haddad, “Numerical stability of multi-rate system using Lyapunov’s theorem: Applied to real-time simulation,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2015-June, no. June, pp. 2537–2541, 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125472.
- [34] X. Zhai, “Multi-rate real-time simulation of modular multilevel converter for HVDC grids application,” *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 1325–1330, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216225.
- [35] E. Shoubaki, M. Arefi, M. Chamana, B. H. Chowdhury, and B. Parkideh, “Time base synchronization for interconnecting Real-Time platforms in co-simulation,” *IEEE Ind. Appl. Soc. 52nd Annu. Meet. IAS 2016*, pp. 4–7, 2016, doi: 10.1109/IAS.2016.7731958.
- [36] J. Montoya, R. Brandl, M. Vogt, F. Marten, M. Maniatopoulos, and A. Fabian, “Asynchronous integration of a real-time simulator to a geographically distributed controller through a co-simulation environment,” *Proc. IECON 2018 - 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 4013–4018, 2018, doi: 10.1109/IECON.2018.8591486.
- [37] D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, and Y. Wu, “Real-time co-simulation platform using OPAL-RT and OPNET for analyzing smart grid performance,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286238.
- [38] P. Peidaee, A. Kalam, and J. Shi, “A real-time simulation framework for system protection in smart grid applications,” *Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2018.8757972.
- [39] V. Venkataramanan, A. Srivastava, and A. Hahn, “Real-time co-simulation testbed for microgrid cyber-physical analysis,” *2016 Work. Model. Simul. Cyber-Physical Energy Syst.*, 2016, doi: 10.1109/MSCPES.2016.7480220.
- [40] Z. Zhou, Q. Zhang, S. Li, Q. Jin, and Y. Zhang, “A real-Time co-simulation research based on VSC closed-loop control,” *2016 IEEE Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2016*, 2016, doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753961.
- [41] C. Rehtanz and X. Guillaud, “Real-time and co-simulations for the development of power system monitoring, control and protection,” *19th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2016*, 2016, doi: 10.1109/PSCC.2016.7541030.
- [42] E. Bompard, “A multi-site real-time co-simulation platform for the testing of control strategies of distributed storage and V2G in distribution networks,” *2016 18th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2016 ECCE Eur.*, 2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7695666.
- [43] W. Wang, H. R. Wickramasinghe, K. Ma, and G. Konstantinou, “Real-time Co-Simulation for Electrical and Thermal Analysis of Power Electronics,” *2019 9th Int. Conf. Power Energy Syst. ICPE 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICPE.2019.9105352.
- [44] T. Duan, Z. Shen, and V. Dinavahi, “Multi-Rate Mixed-Solver for Real-Time Nonlinear Electromagnetic Transient Emulation of AC/DC Networks on FPGA-MPSoC Architecture,” *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 183–194, 2019, doi: 10.1109/jpets.2019.2933250.
- [45] J. Zhu and B. Zhang, “Multi-rate real-time simulation method based on the norton equivalent,” *Energies*, vol. 13, no. 17, 2020, doi: 10.3390/en13174562.
- [46] P. Le-Huy and S. Guérette, “Real-Time Multi-Rate Electromagnetic Transient Simulation on Conventional CPUs,” *Int. Conf. Power Syst. Transients*, 2019.
- [47] F. Li, “Review of Real-time Simulation of Power Electronics,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 796–808, 2020, doi: 10.35833/MPCE.2018.000560.
- [48] P. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, J. Giesbrecht, and L. Arendt, “A real time digital simulator for testing relays,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, 1992, doi: 10.1109/61.108909.
- [49] R. Kuffel, J. Giesbrecht, T. Maguire, R. Wierckx, and M. P., “RTDS - A Fully Digital Power System Simulator Operating in Real Time,” *ICDS '95. First Int. Conf. Digit. Power Syst. Simulators*, pp. 498–503, 1995.
- [50] S. K. Sharma, “Computational Intelligence Techniques Used for Stock Market Prediction: A Systematic Review,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 07, no. 03, pp. 176–182, 2021, [Online]. Available: <http://www.ijmst.com/vol7issue03.html>.
- [51] N. Lin and V. Dinavahi, “Detailed Device-Level Electrothermal Modeling of the Proactive Hybrid HVDC Breaker for Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation of DC Grids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1118–1134, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2685423.
- [52] Xiaoping Tu, Louis-A. Dessaint, Nicolas Fallati and Bruno De Kelper, “Modeling and real-time simulation of internal faults in synchronous generators with parallel-connected windings,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1400–1409, 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.892004.
- [53] H. Li, M. Steurer, K. L. Shi, S. Woodruff, and D. Zhang, “Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware-in-the-loop real-time simulation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1144–1151, 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.878319.
- [54] R. V. Chacko, M. L. Sreedevi, and G. R. Mineeshma, “Electric vehicle power train simulation in forward modelling approach to enable real-time simulation and HIL controller prototyping,” *2014 IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2014*, 2014, doi: 10.1109/PEDES.2014.7042039.
- [55] N. D. Peñafiel Ojeda, “Diseño e implementación de banco de pruebas para validación de protecciones eléctricas ante fallas en sistemas de distribución mediante simulación en tiempo real,” Universidad de los Andes, 2014.
- [56] L. A. Montoya Salazar, “Implementación de protecciones adaptativas por medio de simulación RT-HIL,” Universidad de Los Andes, 2012.
- [57] J. E. Malo Rojas, “Simulación en tiempo real de un sistema de almacenamiento de energía a base de baterías,” Universidad de Los Andes, 2015.
- [58] M. Tursini, L. Di Leonardo, C. Olivieri, and E. Della Loggia, “Rapid control prototyping of IPM drives by real time simulation,” *Proc. - 8th EUROSIM Congr. Model. Simulation, EUROSIM 2013*, pp. 364–371, 2015, doi: 10.1109/EUROSIM.2013.116.
- [59] A. Teplyakov, E. Petlenkov, and J. Belikov, “Implementation and real-time simulation of a fractional-order controller using a MATLAB based prototyping platform,” *2012 13th Bienn. Balt. Electron. Conf.*, pp. 145–148, 2012, doi: 10.1109/BEC.2012.6376837.
- [60] L. Jun, G. Ying-Qing, and W. Hai-Quan, “Rapid prototyping real-time simulation platform for digital electronic engine control,” *2008 2nd Int. Symp. Syst. Control Aerosp. Astronaut. ISSCAA 2008*, no. 188, 2008, doi: 10.1109/ISSCAA.2008.4776230.
- [61] K. “MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2337512.
- [62] C. Lin, D. Liu, X. Wu, Z. He, W. Wang, and W. Li, “Setup and performance of a combined hardware-in-loop and software-in-loop test for MMC-HVDC control and protection system,” *9th Int. Conf. Power Electron. - ECCE Asia "Green World with Power Electron. ICPE 2015-ECCE Asia*, pp. 1333–1338, 2015, doi: 10.1109/ICPE.2015.7167952.

- [63] P. Forsyth, T. Maguire, and R. Kuffel, "Real time digital simulation for control and protection system testing," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 1, pp. 329–335, 2004, doi: 10.1109/pesc.2004.1355765.
- [64] C. Rehtanz and X. Guillaud, "Real-time and co-simulations for the development of power system monitoring, control and protection," *19th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2016*, pp. 1–20, 2016, doi: 10.1109/PSCC.2016.7541030.
- [65] E. Gómez-Luna, L. Palacios-Bocanegra, and J. E. Candeló-Becerra, "Real-time simulation with OPAL-RT technologies and applications for control and protection schemes in electrical networks," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 12, no. 3, pp. 136–144, 2019, doi: 10.25103/jestr.123.19.
- [66] F. Quintero-Zuluaga *et al.*, "Hardware in the loop design and testing of a PMU-based special protection scheme: Case study of colombia-ecuador interconnection," *2020 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Exhib. - Lat. Am. TD LA 2020*, 2020, doi: 10.1109/TDLA47668.2020.9326098.
- [67] J. F. Quintero-Zuluaga *et al.*, "Decision Tree-Based Automated Test-Bed for Performance Validation of Line Protection Relays Using a Hardware-in-the-Loop Architecture," *2020 IEEE Colomb. Conf. Appl. Comput. Intell. ColCACI 2020 - Proc.*, 2020, doi: 10.1109/ColCACI50549.2020.9247877.
- [68] X. Wu, H. Figueroa, and A. Monti, "Testing of digital controllers using real-time hardware in the loop simulation," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 5, pp. 3622–3627, 2004, doi: 10.1109/PESC.2004.1355116.
- [69] J. D. Bernal Burgos, "Desarrollo de una plataforma de procesamiento en tiempo real y Hardware in the Loop para el uso y configuración de protecciones adaptativas.," Universidad de los Andes, 2014.
- [70] G. A. Granados García, "Diseño de un sistema RT-HIL para uso de relés en condición de protecciones adaptativas," Universidad de los Andes, 2015.
- [71] D. I. Clavijo Rey, "Metodología para realización de pruebas end-to-end en laboratorio," Universidad de Los Andes, 2016.
- [72] E. Gomez-Luna, C. Zapata, and M. F. Bravo, "Simulación en tiempo real como parte de la validación para la implementación de subestaciones digitales," *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8985001.
- [73] M. Chaitanya, G. Gurralla, and G. Narayanan, "Real-Time simulation of an Islanded microgrid using educational Miniature Full Spectrum Simulator," *2016 Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2016*, no. 1, 2016, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858980.
- [74] P. M. Menghal and A. J. Laxmi, "Real time simulation: A novel approach in engineering education," *ICECT 2011 - 2011 3rd Int. Conf. Electron. Comput. Technol.*, vol. 1, pp. 215–219, 2011, doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5941592.
- [75] M. Heras Cervantes, M. C. García Ramirez, J. Correa Gómez, A. C. Tellez Anguiano, and F. Martínez Cárdenas, "Real-time simulation of a buck converter for educational purposes in a LabVIEW®-programmed FPGA," *2014 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput.*, pp. 2–7, 2014, doi: 10.1109/ROPEC.2014.7036306.
- [76] Z. Jiang, G. Konstantinou, Z. Zhong, and P. Acuna, "Real-Time digital simulation based laboratory test-bench development for research and education on solar pv systems," *2017 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282471.
- [77] J. Montoya, R. Brandl, M. Vogt, F. Marten, M. Maniopoulos, and A. Fabian, "Asynchronous integration of a real-time simulator to a geographically distributed controller through a co-simulation environment," *Proc. IECON 2018 - 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 4013–4018, 2018, doi: 10.1109/IECON.2018.8591486.
- [78] S. Vogel, "Improvements to the Co-simulation Interface for Geographically Distributed Real-time Simulation," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2019-October, pp. 6655–6662, 2019, doi: 10.1109/IECON.2019.8926918.
- [79] M. O. Faruque, M. Sloderbeck, M. Steurer, and V. Dinavahi, "Thermoelectric co-simulation on geographically distributed real-time simulators," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09*, pp. 1–7, 2009, doi: 10.1109/PES.2009.5275631.
- [80] C. Mao, "A 400-V/50-kVA Digital-Physical Hybrid Real-Time Simulation Platform for Power Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 5, pp. 3666–3676, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2760844.
- [81] A. Benigni and A. Monti, "A parallel approach to real-time simulation of power electronics systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 9, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2361868.
- [82] H. Morais, P. Vancraeyveld, A. H. B. Pedersen, M. Lind, H. Johannsson, and J. Ostergaard, "SOSPO-SP: Secure operation of sustainable power systems simulation platform for real-time system state evaluation and control," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2318–2329, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2321521.
- [83] V. Karapanos, S. De Haan, and K. Zwetsloot, "Real time simulation of a power system with VSG hardware in the loop," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3748–3754, 2011, doi: 10.1109/IECON.2011.6119919.
- [84] G. W. Chang, Y. J. Liu, V. Dinavahi, and M. J. Ke, "Applications of real-time simulation techniques for harmonics study of an industrial power system," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596633.
- [85] M. Steurer and S. Woodruff, "Real time digital harmonic modeling and simulation: An advanced tool for understanding power system harmonics mechanisms," *2004 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, pp. 1–4, 2004, doi: 10.1109/pes.2004.1372921.
- [86] Energetica 2030, *Webinar - Real Time Simulation Advantages for large infrastructures*. <https://youtu.be/d13Z7LsJe88>, 2020.
- [87] L. A. Montoya, D. Montenegro, and G. Ramos, "Adaptive protection testbed using real time and hardware-in-the-loop simulation," *2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013*, 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652149.
- [88] Mehdi Monadi, Cosmin Koch-Ciobotaru, Alvaro Luna, Jose Ignacio Candela, and P. Rodriguez, "Implementation of the differential protection for MVDC distribution systems using real-time simulation and hardware-in-the-loop," *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3380–3385, 2015, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310137.
- [89] D. X. Du, "Design of a real time digital simulation system for test of new protection schemes," *2006 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON2006*, 2006, doi: 10.1109/ICPST.2006.321643.
- [90] Z. Q. Bo, A. Klimek, Y. L. Ren, and J. H. He, "A real time digital simulation system for testing of integrated protection schemes," *2008 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON IEEE Power India Conf. POWERCON 2008*, 2008, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745260.
- [91] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, and J. Tang, "A generic real-time computer simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2090–2093, 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849459.
- [92] P. Romano, M. Pignati, and M. Paolone, "Integration of an IEEE Std. C37.118 compliant PMU into a real-time simulator," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2015, doi: 10.1109/PTC.2015.7232794.
- [93] B. C. Karatas, H. Johannsson, and A. H. Nielsen, "Real-time countermeasures preventing power system instability by using PMU data from RTDS simulation," *IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1787–1791, 2016, doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779796.
- [94] A. W. Reis, F. G. K. Guarda, and C. C. Gastaldini, "Simulation of a Phasor Measurement Unit in Real Time Using Typhoon Virtual HIL," *2019 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Lat. Am. 2019*, 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895261.
- [95] D. Liu, "A flexible real time network model for evaluating HVDC systems' impact on AC protection performance," *9th Renew. Power Gener. Conf.*, pp. 216–221, 2021, doi: 10.1049/icp.2021.1372.
- [96] D. Liu, "Hardware-in-the-Loop Tests and Analysis of HvdC System'S Impact on Distance Protection Performance," *17th Int. Conf. AC DC Power Transm.*, pp. 96–101, 2021, doi: 10.1049/icp.2021.2451.
- [97] Y. Zhang, H. Ding, and R. Kuffel, "Key techniques in real time digital simulation for closed-loop testing of HVDC systems," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 125–130, 2017, doi: 10.17775/cseejpes.2017.0016.
- [98] C. A. Amado López, "Simulación Real Time de un Sistema HVDC-VSC Multiterminal," Universidad de los Andes, 2014.
- [99] B. Bruned, S. Denetière, J. Michel, M. Schudel, J. Mahseredjian, and N. Bracikowski, "Compensation method for parallel real-time EMT studies☆," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 198, no. November 2021, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2021.107341.
- [100] S. Zhang, B. Liu, S. Zheng, Y. Ma, F. Wang, and L. M. Tolbert, "Development of a Converter-Based Transmission Line Emulator with

- Three-Phase Short-Circuit Fault Emulation Capability,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10215–10228, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2805835.
- [101] Y. S. Borovikov, A. S. Gusev, A. O. Sulaymanov, and R. A. Ufa, “Hybrid real-time simulator of power system for advanced simulation of the FACTS and HVDC system based on voltage source converter,” *2014 2nd Int. Conf. Syst. Informatics, ICSAI 2014*, pp. 148–152, 2015, doi: 10.1109/ICSAI.2014.7009276.
- [102] P. Dong, “Real time simulation on the second channel from xinjiang to northwest power network with multi facts,” *Int. Conf. Renew. Power Gener. (RPG 2015)*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1049/cp.2015.0351.
- [103] A. Sharma, S. C. Srivastava, and S. Chakrabarti, “Testing and Validation of Power System Dynamic State Estimators Using Real Time Digital Simulator (RTDS),” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2338–2347, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2453482.
- [104] Y. S. Borovikov, A. S. Gusev, and R. A. Ufa, “Advanced Simulation of the Power Electronic Converters of VSC FACTS and HVDC in Hybrid Real Time Simulators of Power System,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 698, pp. 749–754, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.698.749.
- [105] I. Etxeberria-Otadui, V. Manzo, S. Bacha, and F. Baltès, “Generalized average modelling of FACTS for real time simulation in ARENE,” *IEEE 2002 28th Annu. Conf. Ind. Electron. Soc.*, vol. 2, pp. 864–869, 2002, doi: 10.1109/IECON.2002.1185385.
- [106] G. Koundal and S. L. Shimi, “Recent Trends on Real Time Simulation of FACTS: A Review,” *2018 Int. Conf. Comput. Charact. Tech. Eng. Sci. CCTES 2018*, pp. 230–235, 2018, doi: 10.1109/CCTES.2018.8674160.
- [107] C. Dufour and J. Belanger, “On the use of real-time simulation technology in smart grid research and development,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 3963–3970, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2315507.
- [108] F. Guo *et al.*, “Comprehensive real-time simulation of the smart grid,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2, pp. 899–908, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2240642.
- [109] D. Anderson, Chuanlin Zhao, C. Hauser, V. Venkatasubramanian, D. Bakken, and A. Bose, “Real-Time Simulation for Smart Grid Control and Communications Design,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 49–57, 2011, doi: 10.1109/mpe.2011.943205.
- [110] Y. Borovikov, A. Prokhorov, and M. Andreev, “Application of Hybrid Real Time Simulator for solution of Smart Grid tasks on the example of Elgaugol energy cluster pilot project,” *Proc. - 2012 7th Int. Forum Strateg. Technol. IFOST 2012*, 2012, doi: 10.1109/IFOST.2012.6357822.
- [111] F. Guo, “Real time simulation for the study on smart grid,” *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, pp. 1013–1018, 2011, doi: 10.1109/ECCE.2011.6063883.
- [112] Nzimako Onyinyechi and Athula Rajapakse, “Real Time Simulation of a Microgrid with Distributed Energy Resources,” *2016 Int. Conf. Cogener. Small Power Plants Dist. Energy*, 2016, doi: 10.1109/COGEN.2016.7728945.
- [113] E. Kotsakis, G. Fulli, and M. Masera, “Smart grid interoperability lab at the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission,” *AEIT Int. Annu. Conf.*, 2016, doi: 10.23919/AEIT.2016.7892769.
- [114] M. Manbachi *et al.*, “Real-Time Co-Simulation Platform for Smart Grid Volt-VAR Optimization Using IEC 61850,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 12, no. 4, pp. 1392–1402, 2016, doi: 10.1109/TII.2016.2569586.
- [115] M. Brenna, “Real time simulation of smart grids for interface protection test and analysis,” *ICHQP 2010 - 14th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, 2010, doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625444.
- [116] X. Feng, T. Yan, A. Zhang, H. Zhang, H. Liu, and X. Wei, “A Matlab-based digital-physical hybrid real-time simulation platform for power system,” *2018 Chinese Control Decis. Conf.*, pp. 4253–4258, 2018, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407863.
- [117] X. Meng, K. Lin, A. Model, and P. Cell, “Research on photovoltaic power system of microgrid based on real-time simulation,” *2017 IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr.*, 2017, doi: 10.1109/EI2.2017.8245676.
- [118] D. F. Gómez Saza, “Implementación de co-simulación de un sistema de distribución de MT/BT en plataforma de simulación en tiempo real,” Universidad de Los Andes, 2016.
- [119] J. G. Villareal Montoya, “Estudio de calidad de potencia en una micro red eléctrica integrada a un sistema de distribución local haciendo uso de simulación en tiempo real,” Universidad del Valle, 2019.
- [120] J. G. Villarreal-Montoya, E. Gómez-Luna, and E. Marlés-Sáenz, “Power quality assessment of the interconnection of a microgrid to a local distribution system using real-time simulation,” *DYNA*, vol. 87, no. 213, pp. 28–33, 2020, doi: 10.15446/dyna.v87n213.81686.
- [121] A. M. Bouzid, P. Sicard, J. N. Paquin, and A. Yamane, “A robust control strategy for parallel-connected distributed generation using real-time simulation,” *IEEE 7th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2016*, 2016, doi: 10.1109/PEDG.2016.7527055.
- [122] H. Fakhm, F. Colas, and X. Guillaud, “Real-time simulation of multi-agent system for decentralized voltage regulation in distribution network,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2011, doi: 10.1109/PES.2011.6039676.
- [123] R. K. Varma, E. M. Siavashi, B. Das, and V. Sharma, “Real-time digital simulation of a PV solar system as STATCOM (PV-STATCOM) for voltage regulation and power factor correction,” *IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 157–163, 2012, doi: 10.1109/EPEC.2012.6474942.
- [124] B. L. Schenkman, D. G. Wilson, R. D. Robinett, and K. Kukolich, “PhotoVoltaic distributed generation for Lanai power grid real-time simulation and control integration scenario,” *SPEEDAM 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 154–157, 2010, doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542249.
- [125] S. Faddel, A. T. Al-Awami, and M. A. Abido, “Real time digital simulation of voltage-based controller for electric vehicle charging,” *Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2016*, 2016, doi: 10.1109/PSC.2016.7462863.
- [126] L. Bao, L. Fan, and Z. Miao, “Real-Time Simulation of Electric Vehicle Battery Charging Systems,” *2018 North Am. Power Symp. NAPS 2018*, 2018, doi: 10.1109/NAPS.2018.8600543.
- [127] H. Bai, H. Luo, C. Liu, D. Paire, and F. Gao, “Real-Time Modeling and Simulation of Electric Vehicle Battery Charger on FPGA,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1536–1541, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781109.
- [128] R. O. Nemeş, S. M. Ciornei, M. Ruba, and C. Martiş, “Real-time simulation of scaled propulsion unit for light electric vehicles,” *2018 ELEKTRO*, 2018, doi: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398345.
- [129] S. Vavilapalli, U. Subramaniam, S. Padmanaban, and V. K. Ramachandaramurthy, “Design and real-time simulation of an AC voltage regulator based battery charger for large-scale PV-grid energy storage systems,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25158–25170, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2768438.
- [130] D. G. Fernández Vargas, “Modelo de simulación en tiempo real (OPAL-RT) de un sistema de distribución que presente conexión y desconexión de vehículos eléctricos.” Universidad de Los Andes, Bogotá, 2014.
- [131] M. Bounabi, M. S. Ait-Cheikh, C. Larbes, K. Kaced, and Z. E. Dahmane, “Hardware-in-the-loop FPGA-based real-time simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter for grid interactive photovoltaic power plant,” *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, 2017, doi: 10.1109/PTC.2017.7981232.
- [132] S. Jena, G. Panda, and R. Peesapati, “Real-time analysis and simulation of multi-string grid connected photovoltaic inverter using FPGA,” *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, 2016, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584068.
- [133] R. Darbali-Zamora, A. Summers, J. Hernandez-Alvidrez, J. E. Quiroz, J. Johnson, and E. I. Ortiz-Rivera, “Exponential Phase-Locked Loop Photovoltaic Model for PHIL Applications,” *2018 IEEE ANDESCON*, 2018, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564592.
- [134] Z.; Taylor, H. Akhavan-Hejazi, and H. Mohsenian-Rad, “Power hardware-in-loop simulation of grid-connected battery systems with reactive power control capability,” *2017 North Am. Power Symp.*, 2017, doi: 10.1109/NAPS.2017.8107413.
- [135] M. D. Trujillo Riaño, “Comprobación del funcionamiento mediante técnica ‘hardware in the loop’ de convertidores DC-DC tipo : Buck, Boost y Buck-Boost,” Universidad de Los Andes, 2014.
- [136] X. Zheng, C. Julien, H. Chen, R. Podorozhny, and F. Cassez, “Real-time simulation support for runtime verification of cyber-physical systems,” *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 16, no. 4, 2017, doi: 10.1145/3063382.
- [137] M. H. Amini, K. G. Boroojeni, T. Dragicevic, A. Nejadpak, S. S. Iyengar, and F. Blaabjerg, “A comprehensive cloud-based real-time simulation framework for oblivious power routing in clusters of DC microgrids,” *2017 IEEE 2nd Int. Conf. Direct Curr. Microgrids, ICDCM 2017*, pp. 270–273, 2017, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001055.
- [138] E. Franco Manrique, Rafael; Gómez Luna, Eduardo; Franco Mejia, “Sistema de Monitoreo de una Microred Aislada Usando ETAP Real Time,” *Rev. CIDET*, vol. 16, no. 16, pp. 1–8, 2017, [Online]. Available:

- <http://revista.cidet.org.co/>.
- [139] O. Abrishambaf, L. Gomes, P. Faria, J. L. Afonso, and Z. Vale, "Real-time simulation of renewable energy transactions in microgrid context using real hardware resources," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, 2016, doi: 10.1109/TDC.2016.7520009.
- [140] J. N. Paquin, "A modern and open real-time digital simulator of all-electric ships with a multi-platform co-simulation approach," *IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2009*, pp. 28–35, 2009, doi: 10.1109/ESTS.2009.4906490.
- [141] H. Mustafa, K. Kredo, R. Crosbie, R. Bednar, and Z. Alavi, "Real-Time FPGA Simulation of Electric Ship Power System Using High-Level Synthesis," *2019 IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2019*, pp. 377–381, 2019, doi: 10.1109/ESTS.2019.8847870.
- [142] C. Ogilvie, "Modeling Communication Networks in a Real-Time Simulation Environment for Evaluating Controls of Shipboard Power Systems," *2020 IEEE CyberPELS, CyberPELS 2020*, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1109/CyberPELS49534.2020.9311540.
- [143] C. Dufour, C. Andrade, and J. Bélanger, "Real-Time Simulation Technologies in Education : a Link to Modern Engineering Methods and Practices," *Proc. 11th Int. Conf. Eng. Technol. Educ.*, no. May 2014, pp. 114–118, 2010.
- [144] D. Wang, S. Yang, L. Wang, and W. Liu, "Hardware-in-the-loop simulation for aircraft electric power system," *2016 Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electr. Conf. ESARS-ITEC 2016*, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841331.
- [145] D. Wang, S. Yang, L. Wang, and W. Liu, "Bus power control unit development and hardware-in-the-loop evaluation of commercial aircraft electric power system," *2016 IEEE 2nd Annu. South. Power Electron. Conf. SPEC 2016*, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/SPEC.2016.7845999.
- [146] A. Griffo, D. Drury, and D. Salt, "Hardware in the loop based synchronous generator emulation test rig for more electric aircraft power systems," *IET Conf. Publ.*, vol. 2012, no. 592 CP, 2012, doi: 10.1049/cp.2012.0248.
- [147] Q. Dufour, A. Yamane, J. N. Paquin, and K. Al-Haddad, "A Modular Real Time Simulation Solution for More Electric Aircraft Complex Architecture," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2020-Octob, pp. 3717–3721, 2020, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9254926.
- [148] P. Le-Huy, S. Guérette, L. A. Dessaint, and H. Le-Huy, "Real-time simulation of power electronics in power systems usingan FPGA," *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, 2006, doi: 10.1109/CCECE.2006.277356.
- [149] L. A. Gregoire, H. F. Blanchette, J. Belanger, and K. Al-Haddad, "Real-time simulation-based multisolver decoupling technique for complex power electronics circuits," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 5, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2565512.
- [150] M. Milton and A. Benigni, "Latency Insertion Method Based Real-Time Simulation of Power Electronic Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 8, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2757449.
- [151] G. Lauss and K. Strunz, "Accurate and Stable Hardware-in-the-Loop (HIL) Real-time Simulation of Integrated Power Electronics and Power Systems," *IEEE POWER Electron. Regul.*, vol. 36, no. 9, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.3040071.
- [152] J. N. González Guatibonza, "Diseño e implementación de un filtro activo de potencia en derivación para eliminación de contenido armónico en la red eléctrica utilizando la plataforma OPAL-RT," Universidad de los Andes, 2015.
- [153] D. Tormo, R. Vidal-Albalate, L. Idkhajine, E. Monmasson, and R. Blasco-Gimenez, "Study of System-on-Chip devices to implement embedded real-time simulators of modular multi-level converters using high-level synthesis tools," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1447–1452, 2018, doi: 10.1109/ICIT.2018.8352393.
- [154] Y. Wei, D. Shu, X. Xie, V. Dinavahi, and Z. Yan, "Real-Time Simulation of Hybrid Modular Multilevel Converters Using Shifted Phasor Models," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 2376–2386, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2884506.
- [155] J. Zeng, "A DC component elimination control strategy for the interface system of digital-physical hybrid real-Time simulation," *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 515–520, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216091.
- [156] N. Achury Beltrán, "Simulación y control de sistemas de potencia mediante el monitoreo del SPI en Real-Time con el uso de sincrofasores," Universidad de Los Andes, 2014.
- [157] M. A. Ortiz Padilla, "Simulación y Control de Motores de Reluctancia Conmutada," Universidad de Los Andes, 2013.
- [158] C. A. Sarmiento López, "Simulación y control en tiempo real de motores de Reluctancia conmutada," Universidad de Los Andes, 2015.
- [159] M. A. Ortiz Padilla, "Control de motores de reluctancia conmutada para propulsión en vehículos eléctricos," Universidad de Los Andes, 2017.
- [160] E. G. Luna, R. F. Manrique, and E. L. Palacios Bocanegra, "Monitoring and Control System Using ETAP Real-Time on Generation Plant Emulation Using OPAL-RT," *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conf. Proc.*, pp. 0–5, 2018, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564653.
- [161] F. Alvarez-Gonzalez and A. Griffo, "High-fidelity modelling of permanent magnet synchronous motors for real-time hardware-in-the-loop simulation," *8th IET Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives (PEMD 2016)*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.0308.
- [162] R. Iracheta and O. Ramos-Leaños, "Improving computational efficiency of FD line model for real-time simulation of EMTs," *North Am. Power Symp. 2010, NAPS 2010*, 2010, doi: 10.1109/NAPS.2010.5618953.
- [163] J. M. Vahid, L. F. Pak, and V. Dinavahi, "Real-time simulation of grid-connected wind farms using physical aggregation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3010–3021, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2037644.
- [164] S. Ebrahimi, N. Amiri, and J. Jatskevich, "Interfacing of Parametric Average-Value Models of LCR Systems in Fixed-Time-Step Real-Time EMT Simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 4, pp. 1985–1988, 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.3028266.
- [165] A. Hadizadeh, M. Hashemi, M. Labbaf, and M. Parniani, "A Matrix-Inversion Technique for FPGA-Based Real-Time EMT Simulation of Power Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2833058.
- [166] N. Panigrahy, K. S. Gopalakrishnan, T. Ilamparithi, and M. V. Kashinath, "Real-Time Phasor-EMT Hybrid Simulation for Modern Power Distribution Grids," *IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2016*, 2016, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914270.
- [167] V. Jalili-Marandi, J. Belanger, and F. J. Ayres, "Model-in-The-Loop real-time simulation in phasor domain," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 2280–2284, 2014, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864973.
- [168] J. Xu, K. Wang, G. Li, W. Ji, X. Jiang, and H. Zhang, "System-level dynamic phasor models of hybrid AC/DC microgrids suitable for realtime simulation and small signal analysis," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 15, pp. 3607–3617, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1319.
- [169] D. X. Morales, R. D. Medina, and Y. Besanger, "Proposal and requirements for a real-time hybrid simulator of the distribution network," *CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chil. Conf. Electr. Electron. Eng. Inf. Commun. Technol. Proc. IEEE Chilecon 2015*, pp. 591–596, 2016, doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400438.
- [170] P. Le-Huy, J. Huang, F. Guay, and I. Kamwa, "Hybrid simulation and off-the-shelf hardware for efficient real-time simulation studies," *6th IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCon 2020*, pp. 98–103, 2020, doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236440.
- [171] R. Rink and R. Malkowski, "Real-Time hybrid model of a wind turbine with doubly fed induction generator," *2019 IEEE 60th Annu. Int. Sci. Conf. Power Electron. Eng. Riga Tech. Univ. RTUCON 2019 - Proc.*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982306.
- [172] M. O. Faruque, V. Dinavahi, M. Sloderbeck, and M. Steurer, "Geographically distributed thermo-electric co-simulation of all-electric ship," *IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2009*, pp. 36–43, 2009, doi: 10.1109/ESTS.2009.4906491.
- [173] C. Dufour and J. Bélanger, "Discrete time compensation of switching events for accurate real-time simulation of power systems," *IECON IEEE Ind. Electron. Conf.*, vol. 2, pp. 1533–1538, 2001, doi: 10.1109/iecon.2001.976020.
- [174] F. Tian, C. Yue, Z. Wu, and X. Zhou, "Realization of electromechanical transient and electromagnetic transient real time hybrid simulation in power system," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 1–6, 2005, doi: 10.1109/TDC.2005.1546932.
- [175] D. F. Aron Popp, Mathieu Sarrazin, Herman Van der Auweraer, Birte, Ovidiu, Biro Karoly, and Claudia Martis, "Real-time co-simulation platform for electromechanical vehicle applications," *9 Int. Symp. Adv. Top. Electr. th CAL Eng.*, pp. 240–243, 2015, doi: 10.1109/ATEE.2015.7133772.
- [176] P. Wei, Q. Zhou, J. K. Liu, C. G. Wang, and N. Y. Zhang, "Electromechanical-electromagnetic hybrid modelling of ± 800 kV Jinsu UHVDC based on real-time digital simulation device," *12th IET Int. Conf. AC DC Power Transm. (ACDC 2016)*, 2016, doi: 10.1049/cp.2016.0464.
- [177] W. Li and X. Xiao, "Electromagnetic and electromechanical transient

hybrid real-time simulation technology based on RTDS used in subsynchronous resonance research,” *2010 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, 2010, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666393.

- [178] Z. Liu, G. Wang, C. Lin, Z. Wang, and J. Li, “A design of hardware-in-the-loop real-time simulation for large-scale complex electromechanical system,” *CSAA/IET Int. Conf. Aircr. Util. Syst. (AUS 2018)*, 2018, doi: 10.1049/cp.2018.0284.
- [179] B. Kroposki, “Autonomous Energy Grids: Controlling the Future Grid With Large Amounts of Distributed Energy Resources,” *IEEE Power Energy Mag.*, no. 6, pp. 37–46, 2020, doi: 10.1109/MPE.2020.3014540.



Luis Felipe Gaitán Cubides received his B.Sc. from the *Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas*. He is currently working toward the M.Eng. degree in Transmission and Distribution Systems from *Universidad Pontificia Bolivariana*. Currently he is a Design Engineer in the protection studies area at *Ingenieria Especializada IEB S.A.* His major research

is the protection of electrical power systems with distributed generators of Non-Conventional Sources of Renewable Energy.



Jorge Wilson Gonzalez Sanchez. Electrical Eng., MSc. and PhD. Professor at *Universidad Pontificia Bolivariana*, Colombia in Electrical Eng. Faculty. Formerly, he was with *HMV Consulting*, Siemens PTD Germany and for Utility *EPM*. He was a researcher at Univ. Kempten and Power Systems Inst.

Erlangen Univ. Germany. His research activities include protective relaying, optimization, power systems, HVDC, FACTS, substations and renewable energies.



Luis Alfonso Giraldo Velazquez Electrical Eng., MEconSc at *Universidad Nacional de Colombia*. IEEE Senior Member. Technical advisor at *Ingenieria Especializada IEB S.A.* Formerly, he was with Baltimore Gas & Electric. His professional experience focuses on studies and tests on electrical protective

equipment. He is currently developing studies and tests with Real Time Digital Simulations - RTDS.