

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



Estudio de las técnicas de solución para HIL de convertidores de potencia

Opción 2: Titulación Integral – Tesis profesional

Elaborada por:

Brayan Ruiz Zavala

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Asesor:

M.C. Leonel Estrada Rojo

Uriangato, Gto.

Noviembre 2021

“Estudio de las técnicas de solución para HIL de convertidores de potencia”

Elaborada por:

Brayan Ruiz Zavala

Aprobado por.....

M.C. Leonel Estrada Rojo

Docente de la carrera de Ingeniería en electrónica

Asesor de tesis profesional

Revisado por.....

Dr. José Eli Eduardo González Durán

Docente de la carrera de Ingeniería en electrónica

Revisor de tesis profesional

Revisado por.....

M.C. Susana Violeta Martínez Hernández

Docente de la carrera de Ingeniería en electrónica

Revisor de tesis profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 26/10/2021

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

Ing. J. Trinidad Tapia Cruz
Director Académico y de Estudios Profesionales
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Table with 2 columns: Field Name and Value. Fields include: Nombre de estudiante y/o egresado(a), Carrera, Nombre del proyecto, and Producto.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Dr. J. Eli Eduardo González Durán
Coordinador de Ingeniería Electrónica
ITSUR



La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

Table with 3 columns and 2 rows. Top row contains signatures. Bottom row contains names and titles: M.C. Leonel Estrada Rojo, Dr. J. Eli Eduardo González Durán, and M.C. Susana Violeta Martínez Hernández.

c.c.p.- Expediente



DEPARTAMENTO
ACADEMICO

CLAVE:ITEIT0002E
TELE-LGR-2021/08

Uriangato, Guanajuato, **26/octubre/2021**

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. Ruiz Zavala Brayán
PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo de titulación bajo la del cual se derivó la Monografía Titulada:

“ Estudio de las técnicas de solución para HIL de convertidores de potencia ”

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE

*Coordinación de la Dirección Tecnológica
Tecnología y Calidad en la Vida*

Dr. J. Elí Eduardo González Durán
Coordinación de Ingeniería Electrónica

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato



COORDINACIÓN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

C.c.p Unidad de Servicios Escolares
C.c.p Coordinación de Ingeniería Electrónica
C.c.p Archivo Consecutivo



Resumen

En este documento se muestra la solución, utilizando diferentes métodos numéricos, del modelo continuo del convertidor reductor para su simulación en tiempo real basada en FPGA. Se realizó la comparación de los diferentes métodos numéricos para poder determinar la eficiencia de los mismos y verificar cuál es más aplicable en la simulación en tiempo real.

El uso de la simulación Hardware In the Loop (HIL, por sus siglas en inglés), ha ganado popularidad para la realización de pruebas en diferentes áreas del quehacer humano, debido a sus ventajas, como son: evitar daños en equipo y personas, reducción del tiempo y costo de pruebas de nuevos productos. La simulación HIL, consiste en el intercambio real de señales entre un dispositivo bajo prueba (Hut, por sus siglas en inglés), y un modelo matemático resuelto en tiempo real. En la actualidad ya existen compañías dedicadas a la fabricación de equipos diseñados para HIL, sin embargo, éstos no son de difícil adquisición, debido a su alto costo, especialmente para universidades y centros de investigación.

Se propone el uso del software LabVIEW® FPGA, como plataforma de desarrollo para sistemas HIL enfocados a convertidores de potencia, éstos presentan dificultades en la simulación en tiempo real debido principalmente a las frecuencias de conmutación usadas para su correcto funcionamiento.

Para corroborar los resultados se compararon entre los obtenidos por el sistema HIL y un convertidor real.

Palabras claves

Simulación HIL, Electrónica de potencia, Convertidor de potencia, Métodos numéricos, Modelado de convertidores.

Abstract

This document shows the solution, using different numerical methods, of the step-down converter continuous model for its simulation in real time based on FPGA. The comparison of the different numerical methods was carried out in order to determine their efficiency and verify which one is more applicable in the real-time simulation.

The use of Hardware In the Loop (HIL) simulation has gained popularity for testing in different areas of human endeavor, due to its advantages, such as: avoiding damage to equipment and people, reduction of the time and cost of testing new products. The HIL simulation consists of the real exchange of signals between a device under test (Hut), and a mathematical model solved in real time. Currently there are already companies dedicated to the manufacture of equipment designed for HIL, however, they are not difficult to acquire, due to their high cost, especially for universities and research centers.

The use of LabVIEW® FPGA software is proposed, as a development platform for HIL systems focused on power converters, they present difficulties in real-time simulation mainly due to the switching frequencies used for their correct operation.

To corroborate the results, they were compared between those obtained by the HIL system and a real converter.

Keywords

HIL simulation, Power electronics, Power converter, Numerical methods, Converter modeling.

Agradecimientos

Para empezar, deseo expresar mi agradecimiento a mi asesor el M.C. Leonel Estrada Rojo por la dedicación y apoyo que me ha brindado en este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas. Gracias por la confianza y el apoyo ofrecido desde que llegué a esta institución. Asimismo, agradezco a mis compañeros, con quienes he compartido experiencias de todo tipo durante estos años. Y además, quiero dar las gracias a mis padres quienes me apoyaron en cada momento que los necesite sin dudarlos.

Dedicatoria

Dedico este proyecto principalmente a mis padres quienes me brindaron todo su apoyo ya que fueron muy importantes para mí a lo largo de todos estos años. Finalmente quiero dedicar este trabajo a todos mis amigos, por apoyarme cuando más los necesite, por hacer de esta experiencia una muy grata y que jamás olvidare.

Brayan Ruiz Zavala

Tabla de contenido

<i>Capítulo 1 Introducción.</i>	12
<i>Capítulo 2 Marco teórico.</i>	14
2.1 Tipos de simulación	14
2.2 Simulación en tiempo real.....	15
2.3 Simulación en línea y fuera de línea.	15
2.4 Simulación HIL.....	16
<i>Capítulo 3 Planteamiento del problema</i>	21
3.1. Identificación.....	21
3.2. Justificación.	21
3.3. Alcance.	21
<i>Capítulo 4 Objetivos</i>	22
4.1. Objetivo general.	22
4.2. Objetivos específicos.	22
<i>Capítulo 5 Metodología</i>	23
5.1 Diseño de convertidor de potencia.....	24
5.2 Modelo convertidor reductor	25
5.4 Simulación de la solución usando métodos numéricos en LabVIEW®	34
<i>Capítulo 6 Resultados</i>	36
<i>Capítulo 7 Análisis de Resultados</i>	47
<i>Capítulo 8 Conclusiones y trabajo a futuro</i>	48
Referencias bibliográficas	49
Anexos	51
Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Euler.....	51
Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de punto medio	52
Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Heun	53
Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Runge Kutta	54

Índice de figuras

Figura 1 Clasificación de tipos de simulación.....	14
Figura 2 Concepto de CHIL y PHIL.....	17
Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología utilizada para desarrollar la simulación HIL.....	23
Figura 4 Esquema básico de un convertidor reductor.....	24
Figura 5 Esquema del convertidor reductor con el interruptor cerrado.....	26
Figura 6 Esquema del convertidor reductor con el interruptor abierto.....	26
Figura 7 Esquema del convertidor reductor en estado discontinuo.....	27
Figura 8 Diagrama de flujo para la implementación del modelo del convertidor reductor.....	35
Figura 9 Modelo discreto del convertidor reductor.....	35
Figura 10 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con Euler a una f_s de 100kHz.....	36
Figura 11 transitorio del convertidor real y HIL con Euler. CH1 v_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.....	37
Figura 12 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con punto medio a una f_s de 100kHz.....	38
Figura 13 Transitorio del convertidor real y HIL con punto medio. CH1 v_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.....	38
Figura 14 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Heun a una f_s de 100kHz.....	39
Figura 15 transitorio del convertidor real y HIL con el método de Heun. CH1 v_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.....	39
Figura 16 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Runge Kutta a una f_s de 100kHz.....	40
Figura 17 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Runge Kutta. CH1 v_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.....	40
Figura 18 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método Euler a una f_s de 50kHz.....	41

Figura 19 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Euler a f_s de 50kHz. CH1 v_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL	42
Figura 20 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método del punto medio a una f_s de 50kHz.	42
Figura 21 Transitorio del convertidor real y HIL con el método del punto medio a f_s de 50kHz. CH1 v_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.	43
Figura 22 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Heun a una f_s de 50kHz.	43
Figura 23 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Heun a f_s de 50kHz. CH1 v_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL	44
Figura 24 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Runge Kutta a una f_s de 50kHz.	44
Figura 25 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Runge Kutta a f_s de 50kHz. CH1 v_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 v_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.....	45
Figura 26 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Euler	51
Figura 27 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de punto medio	52
Figura 28 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Heun	53
Figura 29 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Runge Kutta	54

Índice de tablas

Tabla 1.- Componentes del convertidor reductor	25
Tabla 2.- Comparación entre el convertidor real y los modelos HIL con una f_s de 100kHz	41
Tabla 3.- Comparación entre el convertidor real y los modelos HIL con una f_s de 50kHz	45
Tabla 4.- Comparación recursos utilizados y tiempo de solución requerido por cada método numérico.....	46

Capítulo 1 Introducción.

Para el desarrollo de nuevos productos es necesario realizar pruebas para verificar su funcionamiento, la simulación es una etapa indispensable dentro de este proceso. De acuerdo al área en el que el producto este desarrollado se puede llevar a cabo diferentes tipos de simulaciones, la simulación más común es en la cual una computadora personal en conjunto con un *software* especializado realiza la solución de un modelo matemático que representa cierto sistema.

En muchas ocasiones el esquema típico de simulación no permite realizar pruebas sobre hardware que será utilizado en el producto final, es en estos casos que se utiliza la simulación *Hardware In the Loop* (HIL, por sus siglas en inglés), la cual consiste en sustituir a un elemento real con un *hardware* que se comporta como el elemento sustituido usando un modelo matemático resuelto en tiempo real. Por ejemplo, supongamos que se quiere probar el sistema de dirección de un misil, es sumamente costoso realizar pruebas de este sistema de control con un misil real, por lo que el misil se sustituye por un *hardware* que se comporte lo más parecido al sistema físico, de esta forma se puede probar el control de dirección sin la necesidad de tener un misil, lo que ayuda a reducir costos y el tiempo de puesta en marcha de un sistema.

Las simulaciones HIL tienen como características principales el intercambio de señales entre el dispositivo bajo prueba y el simulador. En la simulación HIL se distinguen dos tipos de simulaciones, la *Controller Hardware In the Loop* (CHIL), en la cual se desea probar el controlador, por lo que se sustituye es la planta, también se utiliza la *Power Hardware In the Loop* (PHIL), en la que lo que se desea probar es la planta.

Para llevar a cabo cualquiera de las simulaciones HIL se debe de partir de un modelo matemático, este modelo típicamente se obtiene en el tiempo continuo y por tanto es imposible de programar en sistemas digitales, por lo que es necesario

solucionar el modelo continuo utilizando métodos numéricos, con lo que las ecuaciones diferenciales se transforman a ecuaciones de diferencias que son fácilmente resueltas usando un sistema digital.

Típicamente, en la simulación HIL se usa el método de solución de Euler, debido principalmente a su facilidad de implementación, sin embargo, también se menciona que es el método con mayor error de todos para un mismo paso de integración. Aunque en la literatura se muestra que es posible utilizar otros métodos numéricos, no se presentan resultados del rendimiento de su uso. El uso de estos métodos, en específico con electrónica de potencia, puede tener implicaciones prácticas que afecten su rendimiento, debido principalmente al tiempo de solución del sistema, ya que los convertidores de potencia tienen una dinámica rápida causada por la frecuencia de conmutación de sus elementos. Por lo que verificar cual es el rendimiento de cada método de solución usado en la simulación HIL y sus implicaciones prácticas es de suma importancia.

En este proyecto se utilizará como caso de estudio el convertidor reductor. El modelo basado en ecuaciones diferenciales del convertidor se resolverá en un sistema programable en tiempo real utilizando la solución dada por cuatro métodos numéricos: Euler, punto medio, Heun y Runge-Kutta de 4to orden. Se realizará una comparación entre los métodos con los parámetros de exactitud, tiempo de solución y recursos utilizados.

Capítulo 2 Marco teórico.

2.1 Tipos de simulación

Cuando se habla de simular un circuito, lo que en realidad se está haciendo es traducir el comportamiento del circuito eléctrico en un modelo matemático, tradicionalmente utilizando ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs).

Para que un *software* sea capaz de llevar a cabo una simulación, es por tanto necesario declarar un método de solución de dichas ecuaciones, como Euler o Runge-Kutta, y dependiendo del método escogido, los resultados de la simulación variarán en cada caso.

Además, dependiendo de su naturaleza, existen varios tipos de simulación y hay varias maneras de clasificar dichos tipos, según sus características. En la Figura 1 se muestra una clasificación, en el que las simulaciones posibles se ordenan según si son en tiempo real, en línea y si se realizan sobre *hardware*.

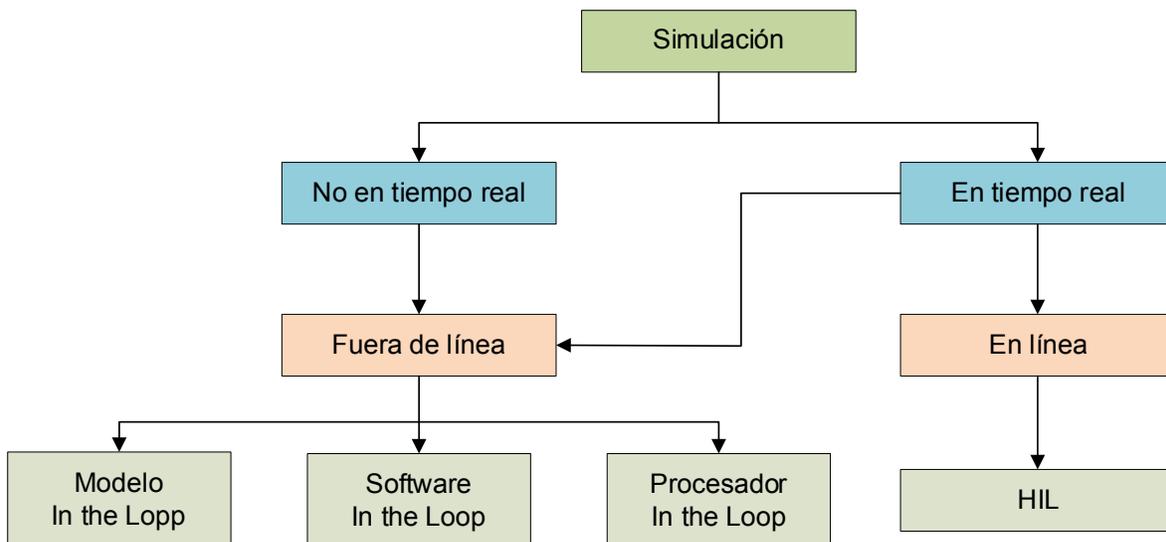


Figura 1 Clasificación de tipos de simulación.

2.2 Simulación en tiempo real

La primera característica para diferenciar una simulación consiste en determinar si dicha simulación se va a ejecutar, o no, en tiempo real. La diferencia fundamental entre una simulación a tiempo real y otra que no se ejecuta a tiempo real es que una simulación en tiempo real (RT), se encuentra sometida a unos tiempos determinados. Es decir, mientras que una simulación que no funciona a tiempo real no tiene limitaciones ni plazos temporales, una simulación RT tiene que ejecutarse en unos instantes determinados.

Este hecho no significa que la simulación del sistema tenga que ejecutarse necesariamente con mayor rapidez, sino que debe proporcionar el dato en el momento adecuado, de modo que simule consistentemente la evolución de la dinámica del sistema.

En la actualidad es posible desplegar simulaciones a tiempo real sobre una computadora con un procesador adecuado, también sobre FPGAs u otro *hardware* similar.

2.3 Simulación en línea y fuera de línea.

El segundo nivel de diferenciación se trata de comprobar si la simulación es *en línea* o, por el contrario, es *fuera de línea*. En una simulación *en línea*, el sistema simulado pasa a formar parte del proceso completo mientras dura la simulación, mientras que en el caso de una simulación *fuera de línea*, la simulación se ejecuta de manera independiente.

Por tanto, es evidente que una simulación *en línea* solamente pueda tener lugar si es además una simulación a tiempo real ya que como en una simulación RT se tiene que cumplir la sincronización de datos, de entradas y salidas con el tiempo del mundo real, es posible que el sistema diseñado se integre en el proceso

durante la simulación, pudiendo lidiar con cambios de parámetros en cualquier momento determinado siendo, por tanto, además, una simulación *en línea*.

También existe la posibilidad de una simulación RT *fuera de línea*, en la que, pese a cumplirse los sincronismos típicos de la simulación en tiempo real el sistema se ejecuta de manera independiente, pero no es muy frecuente su empleo, ya que, si no se va a interactuar en tiempo real con el sistema, no tiene sentido normalmente el empleo de RT.

2.4 Simulación HIL.

Por último, la diferenciación final hace referencia a dónde se lleva a cabo el despliegue del sistema. En caso de llevarse a cabo una simulación de tipo *fuera de línea*, ésta puede ser de tipo modelo, procesador o *Software-In-the-Loop*, mientras que, si se hace una simulación en tiempo real y se despliega sobre un *hardware* determinado, entonces se habla de una simulación *HIL*.

Todo esto conlleva, que mientras que una simulación tradicional fuera de línea y no RT, resuelve las ecuaciones en diferencias del modelo de manera ideal, normalmente conllevando grandes tiempos de simulación, una simulación en línea, a RT y HIL, no solo se debe ajustar a un paso de integración determinado, y debe ser posible interactuar en tiempo real con las señales durante la simulación, sino que además se despliega sobre un *hardware* específico.

De este modo, es fácil comprender por qué las simulaciones HIL están siendo tan bien recibidas, ya que permiten observar los resultados que se obtendría al integrar un sistema con el *hardware* deseado y probar todo tipo de escenarios, en un entorno seguro y de bajo costo. Como ejemplo, en la industria automovilística, empresas como Mazda, ya han optado por el empleo de estas tecnologías para probar y depurar el diseño de los circuitos electrónicos de sus coches, de modo que se puedan realizar pruebas de todo tipo en situaciones difícilmente simulables de otro modo, como altas velocidades, curvas o pendientes. Así se puede

interactuar a tiempo real con el controlador central del automóvil, todo esto previo al paso de producción de dichos circuitos, que se lleva a cabo una vez todo está perfectamente probado, lo cual es altamente eficiente y abarata enormemente los costes.

Una simulación HIL, es la implementación de un modelo de sistema en hardware integrado, que representa parte de un sistema real. El principal requisito de la simulación HIL es que debe realizarse en tiempo real [1].

La simulación HIL juega un papel importante en el desarrollo de tecnología para muchas aplicaciones, presentando ventajas como el corto tiempo de comercialización de nuevos productos; bajo costo de creación de prototipos; y reducción del riesgo de dañar el equipo de prueba y, lo que es más importante, de dañar a las personas durante la prueba.

La electrónica de potencia no ha sido ajena al uso de este tipo de simulación. Dentro de la simulación HIL para electrónica de potencia existen dos grandes esquemas, uno de ellos se le conoce como *Controller* HIL (CHIL, por sus siglas en ingles), y al otro como *Power* HIL (PHIL, por sus siglas en ingles). Mientras que en el CHIL el HuT es el controlador, en el PHIL el HuT es el convertidor de potencia. En la Figura 2 se muestran esquemáticamente estos conceptos.

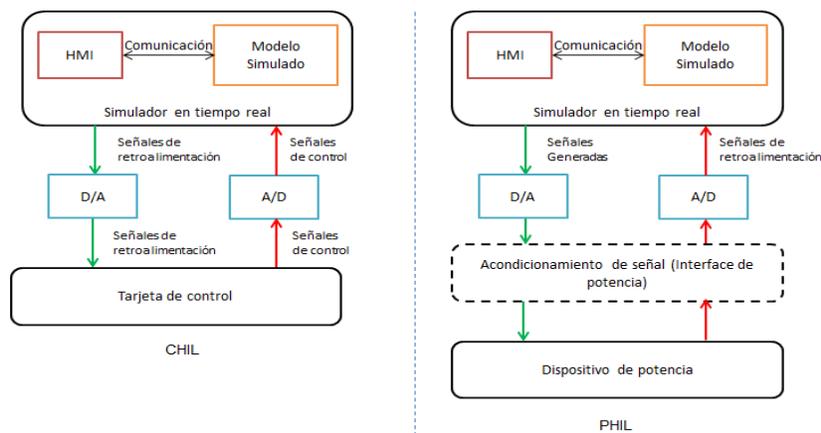


Figura 2 Concepto de CHIL y PHIL.

Hay simuladores comerciales de HIL en tiempo real disponibles, como RTDS® (Winnipeg, MB, Canadá), OPAL-RT® (Montreal, QC, Canadá), Typhoon® (Somerville, MA, EE. UU.) Y dSPACE® (Paderborn, Alemania), por nombrar algunos.

El *software* utilizado por estos simuladores permite al usuario implementar el sistema a través de una interfaz gráfica; Estos tipos de equipos se utilizan para la simulación de modelos complejos y son herramientas que ayudan a los diseñadores e ingenieros de todo el mundo. En [2] se presenta una revisión del estado del arte de las tecnologías de simulación en tiempo real (RTS, por sus siglas en inglés), tanto *hardware* como *software*. Se pueden encontrar muchos ejemplos del uso de esta tecnología en la literatura, incluida la simulación de convertidores de electrónica de potencia. En [3], se presenta la simulación de un Convertidor de Fuente de Voltaje (VSC, por sus siglas en inglés), utilizado en un sistema de Corriente Continua de Alto Voltaje (HVDC, por sus siglas en inglés) para la generación distribuida y la regulación de la calidad de la energía. En [4], se utiliza para probar un nuevo controlador de modo deslizante para un sistema autónomo basado en la generación fotovoltaica. En [5], se utiliza para evaluar convertidores multinivel modulares. Además, en [6], los autores proponen una plataforma de latencia ultra baja para el RTS, que se puede utilizar para sistemas electrónicos de potencia complejos y, como caso de estudio para esta plataforma en particular, un controlador para un generador síncrono de imán permanente (PMSG, por sus siglas en inglés) es simulado.

Como se muestra en estas referencias, la RTS se emplea para probar el controlador utilizado en convertidores de electrónica de potencia y todas las simulaciones utilizan un sistema HIL comercial.

Un inconveniente de estos productos es su alto costo, que puede ascender a decenas de miles de dólares. Como resultado, muchas universidades o centros de investigación no pueden permitirse la adquisición de este tipo de equipos. Debido

a este problema, algunos investigadores han desarrollado soluciones ad-hoc utilizando hardware de bajo costo.

Para fines de investigación, se utilizan principalmente tres tipos de hardware para lograr RTS: Señal digital Procesadores (DSP, por sus siglas en ingles), unidades de procesamiento gráfico (GPU, por sus siglas en ingles) y matrices de puertas programables en campo (FPGA, por sus siglas en ingles). En la actualidad, la FPGA es el hardware más utilizado para RTS [7].

La simulación de convertidores de potencia se puede encontrar en referencias como [8–14]. Estas utilizan FPGA debido a su característica inherente de procesamiento paralelo, que permite la solución rápida de muchas ecuaciones simultáneamente, con breves tiempos de integración, del orden de decenas de nanosegundos.

A menudo, el idioma preferido para la implementación del modelo de sistema es VHDL. Este idioma es la mejor opción cuando el objetivo es minimizar los recursos usados en la FPGA y permite minimizar el paso de integración, sin embargo, el uso de VHDL requiere un diseñador experto, capaz de optimizar las capacidades y la implementación de una aplicación FPGA adecuada, algunos fabricantes de FPGA están comenzando a ofrecer un ambiente de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés), más sencillo para sus FPGA. Estos IDE permiten el desarrollo de aplicaciones utilizando lenguajes de programación de alto nivel como C.

Algunos fabricantes utilizan software de terceros, como MATLAB® o LabVIEW®, para aplicaciones FPGA [15,16]. Algunos autores han propuesto el desarrollo rápido de modelos de electrónica de potencia para simulaciones HIL utilizando estos programas. En [17], se desarrollan un nuevo método RTS para probar técnicas de control no lineal y se describe la metodología para su implementación, pero se basa en un Procesador de Señal Digital (DSP, por sus siglas en inglés), que es más lento que un FPGA. En [18], los autores proponen una metodología

para el desarrollo de una simulación HIL rápida basada en MATLAB®, pero incluye solo una pequeña parte del trabajo y no es suficientemente detallado. En [19], los autores sugieren un desarrollo rápido de HIL basado en MATLAB®; sin embargo, la metodología es solo para el diseño de convertidores fotovoltaicos. En [20], un simulador en tiempo real de alto rendimiento para electrónica de potencia basada en un novedoso motor computacional masivamente paralelo es presentado, se implementa en un sistema de bajo costo utilizando VHDL, pero no hay suficientes detalles en la implementación. En [21], la implementación de un sistema HIL de un sistema de validación para un sistema de gestión de energía utilizado en micro redes es presentado, esta simulación HIL se realiza en una PC y tiene un intervalo de tiempo total de 100 ms, que es más lento que el alcanzado usando una FPGA. Como gran ventaja, el uso de una PC significa un menor costo de implementación.

La empresa *National Instruments* (NI®) ofrece controladores industriales reconfigurables, conocidos como Controladores de entrada y salida reconfigurables (RIO, por sus siglas en inglés). Esta plataforma tiene un enorme potencial para el desarrollo de sistemas de control para aplicaciones de electrónica de potencia y para el desarrollo de sistemas HIL. Se basa en una FPGA combinada con un microprocesador, aunque recientemente, los sistemas RIO fueron implementados utilizando la tecnología *System on Chip* (SoC), que ha demostrado funcionar correctamente en entornos industriales. LabVIEW® es el nombre de la herramienta genérica de desarrollo de software de NI®. Hay un módulo específico para desarrollo de aplicaciones FPGA: el módulo LabVIEW® FPGA. Éste facilita la generación de aplicaciones FPGA, al utilizar un lenguaje gráfico que ayuda a los usuarios no expertos a crear complejas aplicaciones FPGA [22].

Capítulo 3 Planteamiento del problema

- 3.1. Identificación.** Las simulaciones HIL, reportadas en la literatura, muestran un uso importante del método de solución de Euler, debido principalmente a su facilidad de implementación, sin embargo, también se menciona que es el método con mayor error de todos para un mismo tiempo de integración. En algunos otros estudios mencionan que otros métodos numéricos con mejores prestaciones pueden ser utilizados para realizar HIL (cuya principal característica es la solución de un sistema en tiempo real), sin embargo, no se presentan resultados de su implementación y específicamente dentro de convertidores de potencia, los cuales tiene frecuencias de conmutación alta (en el orden de decenas de kHz), por lo que demostrar de manera real las implicaciones de implementar con métodos numéricos diferentes a Euler es estudiada en este trabajo.
- 3.2. Justificación.** Este estudio tiene una alta relevancia a nivel tecnológico y científico, en el primero debido a que la simulación HIL es una tendencia y hay una gran cantidad de investigación en este tema, debido a la convicción de hacer mejores modelos y obtener mayor exactitud en las soluciones, por lo que entender, analizar e implementar en territorio mexicano, estos sistemas es muy importante debido a su pertinencia a nivel mundial, con respecto a la aportación científica es necesario conocer el mejor método numérico para la implementación de convertidores de potencia, así como las implicaciones prácticas.
- 3.3. Alcance.** En este proyecto se realizará el modelado del convertidor reductor por el método de espacios de estados. El modelo basado en ecuaciones diferenciales del convertidor se resolverá en un sistema programable en tiempo real utilizando la solución dada por cuatro métodos numéricos: Euler, punto medio, Heun y Runge-Kutta de 4to orden. Se realizará una comparación entre los métodos con los parámetros de exactitud, tiempo de solución y recursos utilizados.

Capítulo 4 Objetivos

4.1. Objetivo general.

Realizar un estudio de las técnicas de solución para HIL en convertidores de potencia para determinar la eficiencia de los métodos numéricos y verificar cuál de los métodos es más factible

4.2. Objetivos específicos.

- Modelar el convertidor de potencia.
- Diseñar el circuito del convertidor reductor.
- Solucionar el modelo continuo del convertidor por medio de métodos numéricos, como: método de Euler, punto medio, Heun, RK4
- Programar en el software LabVIEW® la solución del convertidor por los métodos seleccionados.
- Implementación de la solución en la FPGA.
- Comparar resultados.

Capítulo 5 Metodología

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada. Un convertidor reductor es utilizado como estudio de caso. El primer paso es el diseño del convertidor. En la literatura se pueden encontrar varias formas de diseñar ambos convertidores. El segundo paso consiste en modelar el convertidor de potencia. Para ello, en el voltaje y la corriente se utilizan ecuaciones diferenciales para cada estado de conmutación del convertidor. En el tercer paso, las ecuaciones obtenidas en el paso dos se resuelven utilizando métodos numéricos; en este caso, mediante los métodos de Euler, punto medio, Heun y RK4. Durante el cuarto paso, se realiza una simulación del convertidor utilizando una herramienta de software, para conocer la mejor representación de punto fijo para las variables involucradas en el convertidor. En el último paso, la implementación de FPGA se realiza utilizando las funciones matemáticas LabVIEW® FPGA de ciclo único

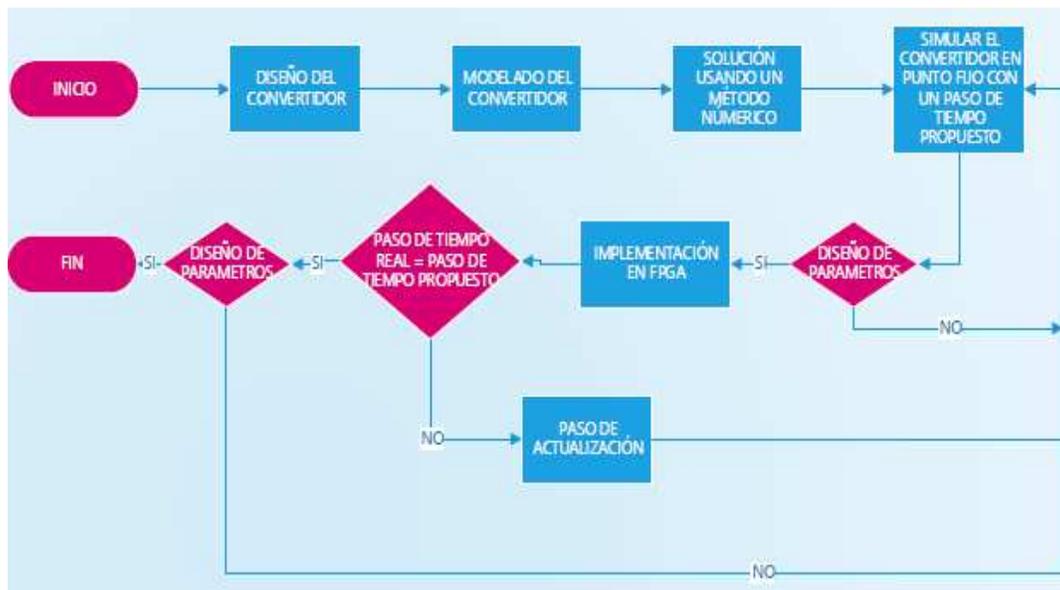


Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología utilizada para desarrollar la simulación HIL.

5.1 Diseño de convertidor de potencia

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el convertidor reductor, cuyo diagrama se muestra en la Figura 4, para probar la metodología.

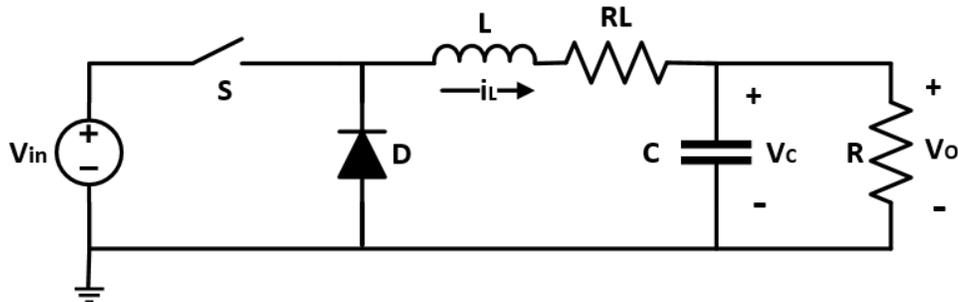


Figura 4 Esquema básico de un convertidor reductor

El convertidor reductor cuenta con 6 elementos:

- Una fuente de alimentación (V_{in})
- Un interruptor (S)
- Un diodo (D)
- Un inductor (L)
- Un capacitor (C)
- Una carga de salida (R)

Para tener un resultado más cercano a la realidad se agregó la resistencia parásita que presentan los inductores (R_L) y la carga de salida se representó como una resistencia.

Para que el convertidor reductor funcione es necesario conmutar el estado del interruptor, es decir, encenderlo y apagarlo cada cierto tiempo, el tiempo que tarda en conmutar el interruptor es algo importante puesto que los circuitos de potencia utilizan tiempos de conmutación muy pequeños. Ahora, para realizar la simulación es necesario considerar el comportamiento del circuito cuando el interruptor está encendido y cuando está apagado.

Los valores de los componentes del convertidor reductor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Componentes del convertidor reductor

Parámetros	Valor	Unidades
V_{in}	24	V
C	10	μF
L	500	μH
R_L	0.12	Ω
R	12	Ω

5.2 Modelo convertidor reductor

Para modelar el convertidor, se hicieron las siguientes consideraciones: el interruptor (S) presenta, el diodo (D) se considera como un voltaje de CC cuando está conduciendo (V_D). El convertidor reductor presenta tres estados de conmutación, según la señal de control y el inductor.

El primer estado ocurre cuando el interruptor está encendido y el diodo no está conduciendo.

El segundo estado comienza cuando el interruptor se apaga y el diodo comienza a conducir.

El último estado es presentado cuando la corriente del inductor es igual a cero. Sin embargo, cuando el convertidor de potencia está funcionando en el modo de conducción continua (CCM), sólo se producen los dos primeros estados. Las ecuaciones diferenciales son obtenidas mediante el uso de las leyes de Kirchhoff. Como se muestra a continuación:

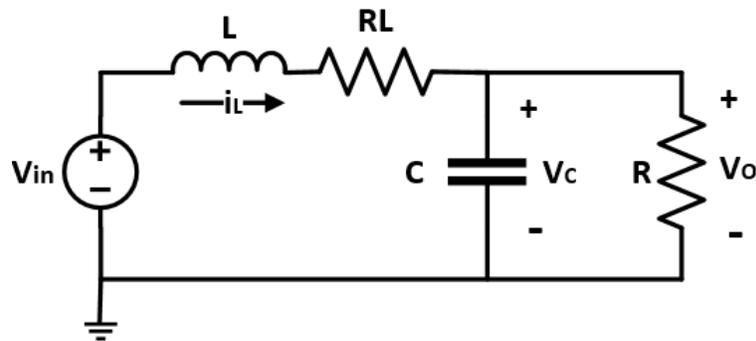


Figura 5 Esquema del convertidor reductor con el interruptor cerrado.

El primer estado a considerar es cuando el interruptor se cierra y actúa como un cortocircuito mientras que el diodo termina bloqueando el paso de la corriente como un circuito abierto dando como resultado un circuito como el de la Figura 5. Aplicando las leyes de Kirchoff al circuito se obtienen las ecuaciones de la corriente del inductor (i_L) y el voltaje en el capacitor (V_C).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_c - i_L R_L}{L} \quad (1a)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C} \quad (1b)$$

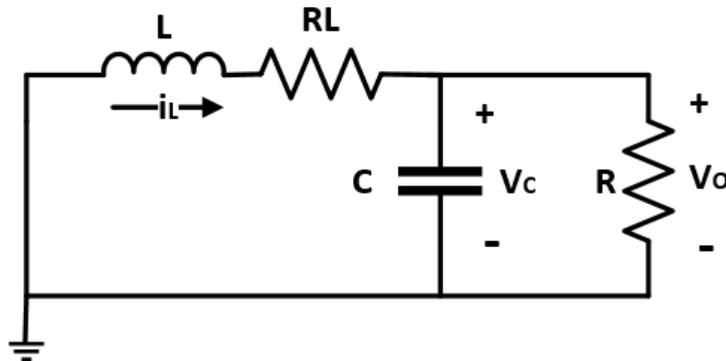


Figura 6 Esquema del convertidor reductor con el interruptor abierto.

El segundo estado es el que se presenta cuando el interruptor se abre e impide el paso de la corriente de la fuente de alimentación mientras que el diodo actúa como un cortocircuito dando como resultado el circuito mostrado en la Figura 6.

En este caso las ecuaciones obtenidas mediante las leyes de Kirchhoff son las siguientes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_c - i_L R_L}{L} \quad (2a)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C} \quad (2b)$$

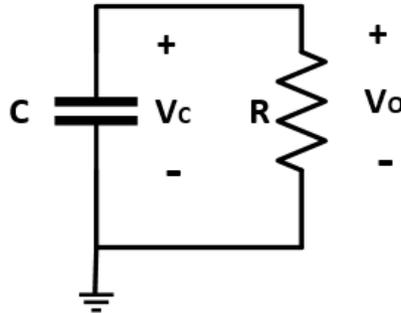


Figura 7 Esquema del convertidor reductor en estado discontinuo

Además, existe un tercer posible estado del circuito el cual se presenta cuando la corriente en el inductor es igual a 0 lo cual se conoce como estado discontinuo y da como resultado el circuito de la Figura 7 dejando al capacitor como el único elemento afectando a la salida.

En este caso las ecuaciones son las siguientes

$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad (3a)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{-i_o}{C} \quad (3b)$$

5.3 Solución del sistema usando métodos numéricos

Para resolver las ecuaciones con el método de Euler es necesaria la siguiente fórmula

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h \quad (4)$$

La ecuación evaluada en x_i y y_i se usa para extrapolar desde un valor anterior y_i a un nuevo valor y_{i+1} en una distancia h

Resolviendo las ecuaciones (1a, 1b) utilizando (4) se obtiene

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} + \frac{h}{L}(V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L) \quad (5)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C}(i_{L(k)} - i_{o(k)})$$

Donde $i_{L(k+1)}$ es el siguiente valor de la corriente del inductor, $i_{L(k)}$ es el valor actual de la corriente y lo mismo aplica para $V_{c(k+1)}$ y $V_{c(k)}$

La solución de las ecuaciones (2a, 2b) con Euler es

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} - \frac{h}{L}(V_{c(k)} + i_{L(k)}R_L) \quad (6)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C}(i_{L(k)} - i_{o(k)})$$

La solución de las ecuaciones (3a, 3b) es:

$$i_{L(k+1)} = 0 \quad (7)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C}(-i_{o(k)})$$

Mientras que el método de Euler solo considera los valores actuales para determinar los siguientes, el método de Heun busca una mayor exactitud prediciendo un valor futuro con lo cual se obtiene un promedio entre el valor actual y el valor previsto para obtener un valor siguiente más cercano a la realidad lo cual se logra con la siguiente fórmula.

$$y^0_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h \quad (8)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y^0_{i+1})h}{2}$$

Aplicando (8) para resolver las ecuaciones (1a, 1b) se obtiene

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} + \frac{h}{2L} \left[(V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L) + \left(i_{L(k)} + \frac{h}{L} (V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L) \right) \right] \quad (9)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{2C} \left[(i_{L(k)} - i_{o(k)}) + \left(V_{c(k)} + \frac{h}{C} (i_{L(k)} - i_{o(k)}) \right) \right]$$

Resolviendo de igual forma las ecuaciones (2a, 2b)

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} - \frac{h}{2L} \left[(V_{c(k)} + i_{L(k)}R_L) + \left(i_{L(k)} * \frac{h}{L} (V_{c(k)} + i_{L(k)}R_L) \right) \right] \quad (10)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{2C} \left[(i_{L(k)} - i_{o(k)}) + \left(V_{c(k)} + \frac{h}{C} (i_{L(k)} - i_{o(k)}) \right) \right]$$

Y las ecuaciones (3a, 3b)

$$i_{L(k+1)} = 0 \quad (11)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{2C} \left[(-i_{o(k)}) + \left(V_{c(k)} + \frac{h}{C} (-i_{o(k)}) \right) \right]$$

El caso del método del punto medio es similar al de Heun, pero en este método no se busca predecir un valor futuro, sino que se busca un valor que se encuentre entre el valor actual y el siguiente mediante las siguientes fórmulas;

$$y_{i+\frac{1}{2}} = y_i + f(x_i, y_i) \frac{h}{2} \quad (12)$$

$$y_{i+\frac{1}{2}} = y_i + f\left(x_{i+\frac{1}{2}}, y_{i+\frac{1}{2}}\right)$$

Utilizando (12) para resolver las fórmulas (1a, 1b) se obtiene como resultado

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} + \frac{h}{L} \left(V_{in} - V_{c(k+\frac{1}{2})} - i_{L(k+\frac{1}{2})}R_L \right) \quad (13)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C} \left(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})} \right)$$

Aplicando el mismo procedimiento para las ecuaciones (2a, 2b) resulta

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} - \frac{h}{L} \left(V_{c(k+\frac{1}{2})} + i_{L(k+\frac{1}{2})} R_L \right) \quad (14)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C} \left(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})} \right)$$

y por último la solución de las ecuaciones (3a, 3b)

$$i_{L(k+1)} = 0 \quad (15)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{h}{C} \left(-i_{o(k+\frac{1}{2})} \right)$$

El último método numérico considerado en esta investigación es el de Runge Kutta de 4° orden el cual es el que realiza más cálculos de todos los métodos considerados.

Las fórmulas que se deben seguir son las siguientes

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (16)$$

Donde

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (16a)$$

$$k_2 = f \left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h \right) \quad (16b)$$

$$k_3 = f \left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h \right) \quad (16c)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3h) \quad (16d)$$

Las ecuaciones (16b, 16c) son muy similares a las del punto medio lo cual implica que este método es el que debería tener una mayor exactitud puesto que considera más valores que los métodos mencionados anteriormente, sin embargo, esto es una teoría de momento.

Ahora usando la fórmula (16) para resolver las ecuaciones del primer estado obtenemos

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (17)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (18)$$

Puesto que se desconoce el valor de las variables que en las ecuaciones (17, 18) es indispensable el uso de las fórmulas (16a-16d) con la ecuación las ecuaciones del primer estado, al usarlas para (1a) da como resultado:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L)}{L} \\ k_2 &= \frac{(V_{in} - V_{c(k+\frac{1}{2})} - i_{L(k+\frac{1}{2})}^1 R_L)}{L} \\ k_3 &= \frac{(V_{in} - V_{c(k+\frac{1}{2})} - i_{L(k+\frac{1}{2})}^2 R_L)}{L} \\ k_4 &= \frac{(V_{in} - V_{c(k+1)} - i_{L(k+1)}^0 R_L)}{L} \end{aligned} \quad (19)$$

Donde

$$V_{c(k+\frac{1}{2})} = V_{c(k)} + \frac{h}{2C}(i_{L(k)} - i_{o(k)})$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^1 = i_{L(k)} + \frac{1}{2}k_1h$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^2 = i_{L(k)} + \frac{1}{2}k_2h$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^0 = i_{L(k)} + k_3h$$

Con esto solo es necesario sustituir las variables k en (17) con las obtenidas en (19)

Siguiendo con el voltaje del capacitor, nuevamente se utilizan las fórmulas (16a-16d) pero ahora con la ecuación (1b) obteniendo los siguientes resultados

Con lo cual se tienen todas las ecuaciones necesarias para realizar las simulaciones.

$$\begin{aligned}k_1 &= \frac{(i_{L(k)} - i_{o(k)})}{C} \\k_2 &= \frac{(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\k_3 &= \frac{(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\k_4 &= \frac{(i_{L(k+1)} - i_{o(k+1)})}{C}\end{aligned}\tag{20}$$

Donde

$$i_{L(k+\frac{1}{2})} = i_{L(k)} + \frac{h}{2L} (V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)} R_L)\tag{20a}$$

Conociendo las variables k de (18) se obtiene la ecuación completa al hacer la sustitución

Pasando al segundo estado, se obtienen las siguientes ecuaciones al usar (16) para resolver (2a, 2b)

$$i_{L(k+1)} = i_{L(k)} + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h\tag{21}$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h\tag{22}$$

Por lo que nuevamente son necesarias las fórmulas (16a-16d) empezando por (2a) se obtienen las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{(-V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L)}{L} \\
 k_2 &= \frac{(-V_{c(k+\frac{1}{2})} - i_{L(k+\frac{1}{2})}^1 R_L)}{L} \\
 k_3 &= \frac{(-V_{c(k+\frac{1}{2})} - i_{L(k+\frac{1}{2})}^2 R_L)}{L} \\
 k_4 &= \frac{(-V_{c(k+1)} - i_{L(k+1)}^0 R_L)}{L}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Donde

$$V_{c(k+\frac{1}{2})} = V_{c(k)} + \frac{h}{2C} (i_{L(k)} - i_{o(k)})$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^1 = i_{L(k)} + \frac{1}{2} k_1 h$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^2 = i_{L(k)} + \frac{1}{2} k_2 h$$

$$i_{L(k+\frac{1}{2})}^0 = i_{L(k)} + k_3 h$$

Con esto es posible utilizar la ecuación (21) conociendo las variables k obtenidas en (23)

Ahora usando las fórmulas (16a-16d) con la ecuación (2b) se consigue

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{(i_{L(k)} - i_{o(k)})}{C} \\
 k_2 &= \frac{(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\
 k_3 &= \frac{(i_{L(k+\frac{1}{2})} - i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\
 k_4 &= \frac{(i_{L(k+1)} - i_{o(k+1)})}{C}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Donde

$$i_{L(k+\frac{1}{2})} = i_{L(k)} + \frac{h}{2L}(V_{in} - V_{c(k)} - i_{L(k)}R_L)$$

Completando la ecuación (22) con lo obtenido en (24) es posible usarla en una simulación.

Para finalizar la parte de las ecuaciones, se deben resolver las ecuaciones del estado discontinuo con (16), debido a que en este estado la corriente del inductor es 0, solo se resolverá la ecuación (3b) con la cual se obtiene

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (25)$$

Y usando las fórmulas (16a-16d) se obtiene

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(-i_{o(k)})}{C} \\ k_2 &= \frac{(-i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\ k_3 &= \frac{(-i_{o(k+\frac{1}{2})})}{C} \\ k_4 &= \frac{(-i_{o(k+1)})}{C} \end{aligned} \quad (24)$$

Con lo cual se tienen todas las ecuaciones necesarias para realizar las simulaciones

5.4 Simulación de la solución usando métodos numéricos en LabVIEW®

Se realizó una simulación de las ecuaciones (5) - (7) para Euler, de la (9) - (11) para Heun, de la (13) - (15) para punto medio, y de la (17) – (26) para RK4 utilizando representación de punto fijo en el Entorno LabVIEW® para determinar la mejor representación numérica. El siguiente paso es la implementación del modelo discreto del convertidor reductor. Su diagrama de flujo se muestra en la Figura 8.

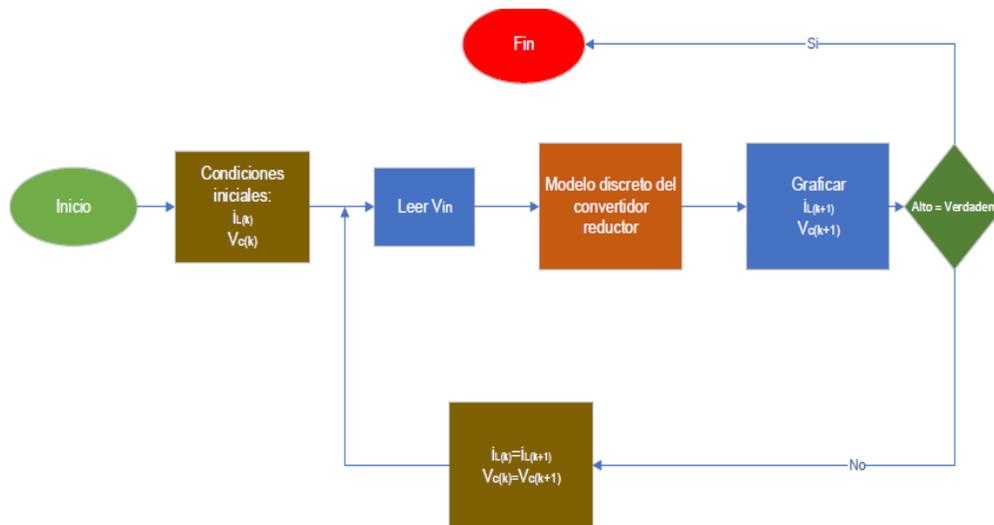


Figura 8 Diagrama de flujo para la implementación del modelo del convertidor reductor

En la Figura 9 se muestra el modelo discreto del convertidor reductor siguiendo los pasos que se deben realizar a la hora de programar los métodos numéricos en LabVIEW®.

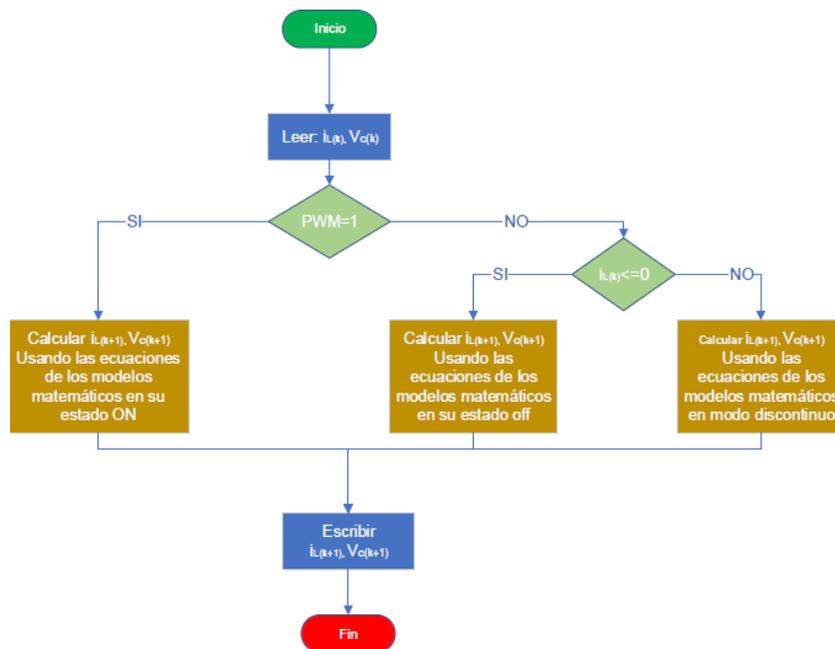


Figura 9 Modelo discreto del convertidor reductor

Capítulo 6 Resultados

Se utilizaron los programas de LabVIEW® mediante una matriz de puertas lógicas programable en campo (FPGA por sus siglas en inglés) de National Instruments para realizar el procesamiento y obtener las señales del convertidor reductor. Utilizando un osciloscopio se obtuvieron los datos reales de la corriente del inductor y el voltaje de salida, que en este caso es igual al voltaje del capacitor, y los datos simulados se obtuvieron mediante el programa LabVIEW® (los diagramas de bloques utilizados se encuentran en la sección de anexos) el cual realiza un muestreo de los resultados en un instante de tiempo y, para una mejor apreciación de los resultados de la simulación, se graficaron mediante el programa MATLAB®.

En la Figura 10 se muestra la comparación en MATLAB® del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Euler con una frecuencia de conmutación de 100kHz. Mientras que la Figura 11 muestra las señales directamente desde el osciloscopio.

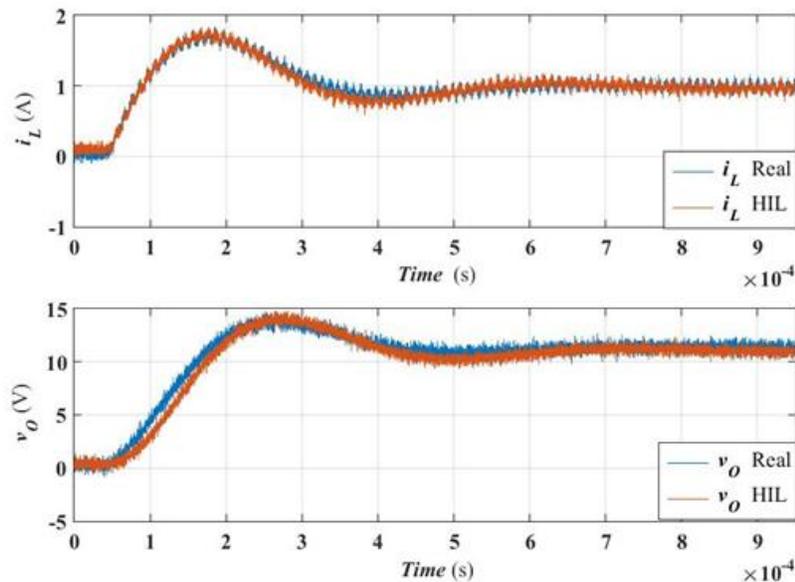


Figura 10 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con Euler a una f_s de 100kHz.

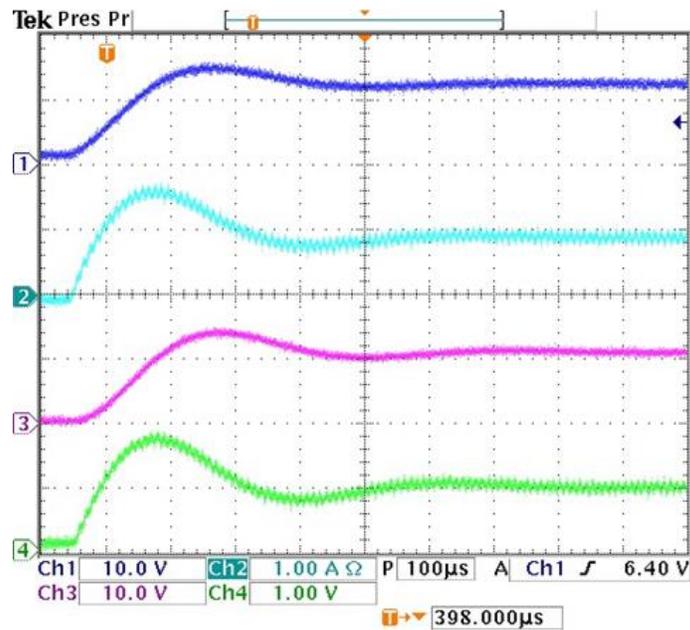


Figura 11 Transitorio del convertidor real y HIL con Euler. CH1 V_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 12 se tiene la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método del punto medio con una frecuencia de conmutación de 100kHz. Mientras que la Figura 13 muestra las señales obtenidas desde el osciloscopio.

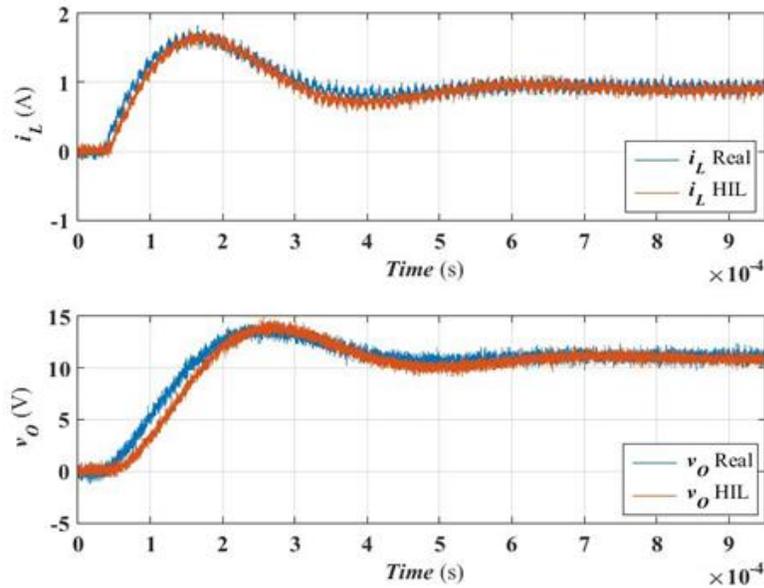


Figura 12 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con punto medio a una f_s de 100kHz.

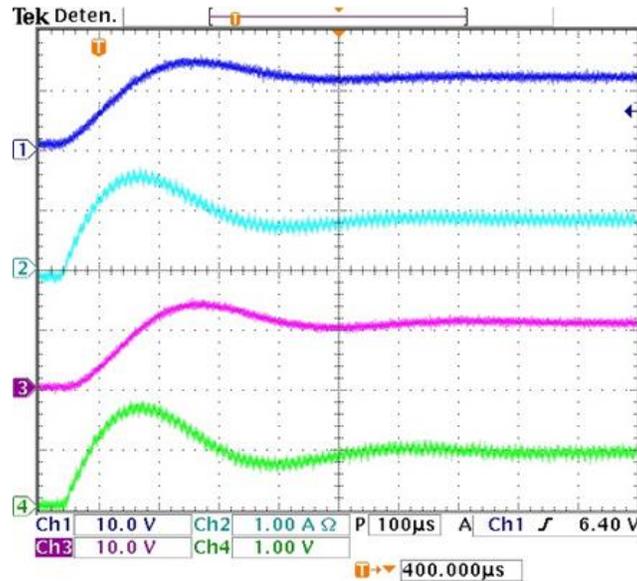


Figura 13 Transitorio del convertidor real y HIL con punto medio. CH1 V_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 14 se tiene la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Heun con una frecuencia de conmutación de 100kHz. La Figura 15 muestra las señales obtenidas desde el osciloscopio.

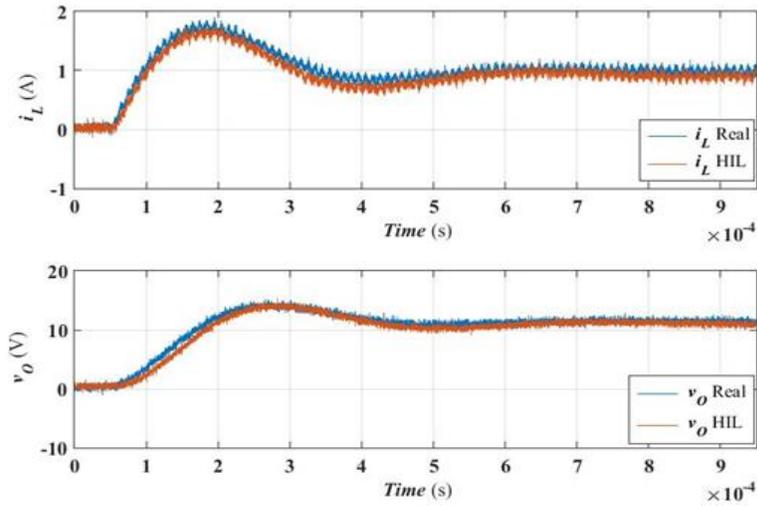


Figura 14 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Heun a una f_s de 100kHz.

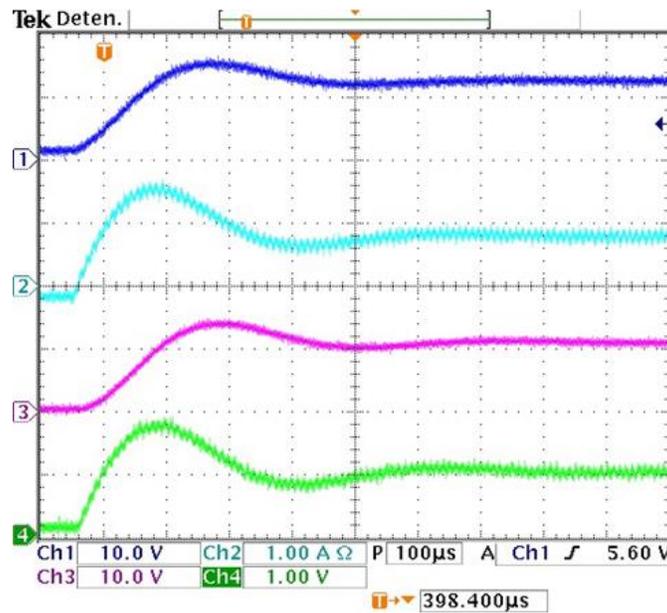


Figura 15 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Heun. CH1 V_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 16 se tiene la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Runge Kutta con una frecuencia de conmutación de 100kHz. La Figura 17 muestra las señales obtenidas desde el osciloscopio.

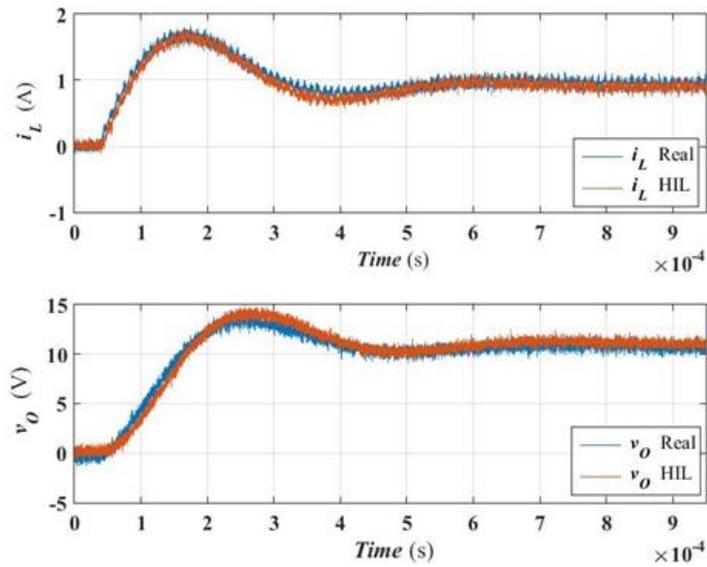


Figura 16 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Runge Kutta a una f_s de 100kHz.

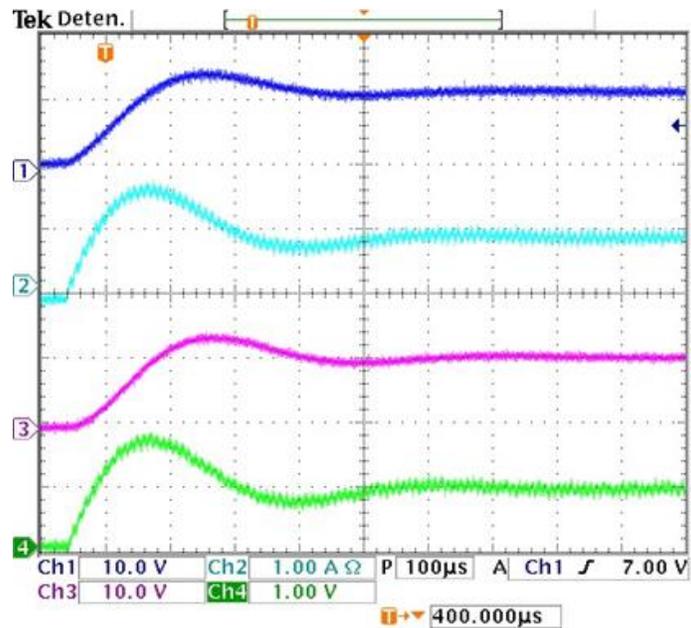


Figura 17 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Runge Kutta. CH1 V_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

Una vez adquiridos los resultados de todos los métodos numéricos utilizando una frecuencia de conmutación (f_s) de 100kHz, se obtuvo el error medio aritmético, MAE por sus siglas en inglés, el cual es el promedio de todos los errores en cada

instante de tiempo que se muestreo, comparando los resultados de las simulaciones con los del circuito real. Así se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 2.- Comparación entre el convertidor real y los modelos HIL con una f_s de 100kHz

Método	EMA V_o	EMA i_L
Euler	0.591586345	0.057833333
Punto medio	0.635297661	0.078457986
Heun	0.594257028112421	0.100714859437747
RK4	0.550870174	0.08064813

En la Figura 18 se muestra la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Euler con una frecuencia de conmutación de 50kHz. Mientras que la Figura 19 muestra las señales directamente desde el osciloscopio.

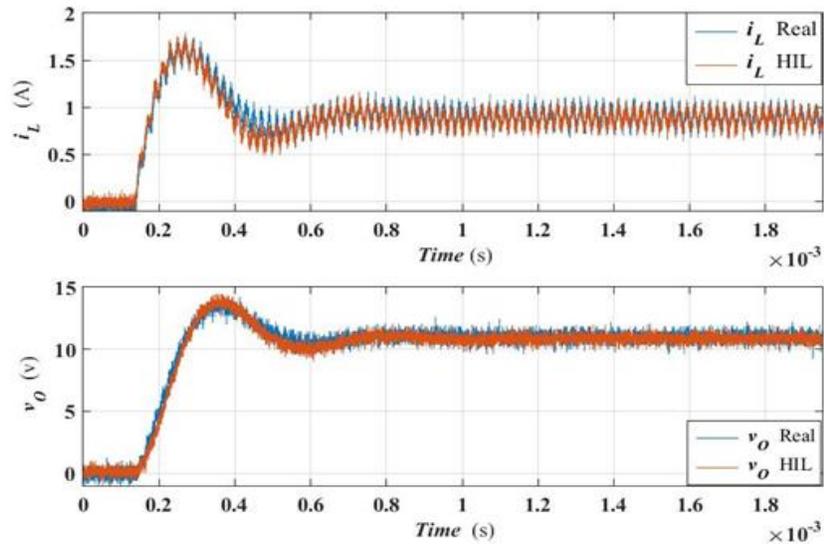


Figura 18 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método Euler a una f_s de 50kHz.

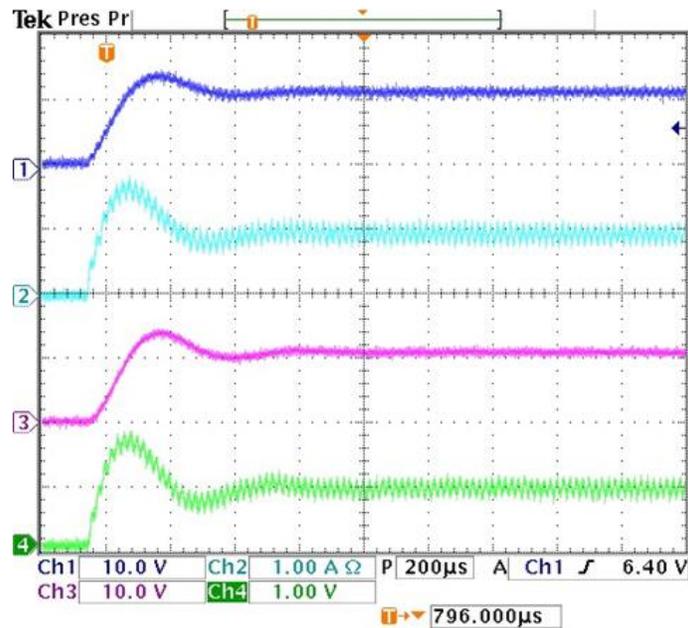


Figura 19 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Euler a f_s de 50kHz. CH1 V_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 20 se muestra la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método del punto medio con una frecuencia de conmutación de 50kHz. Mientras que la Figura 21 muestra las señales directamente desde el osciloscopio.

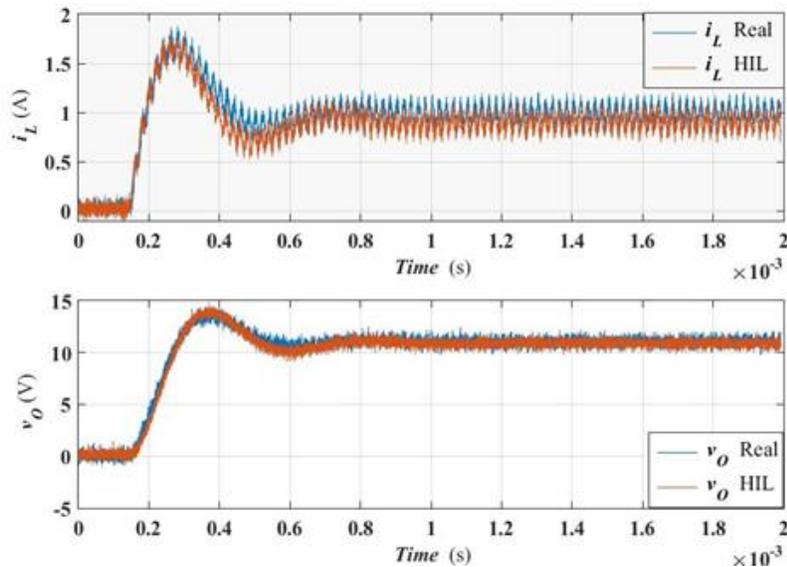


Figura 20 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método del punto medio a una f_s de 50kHz.

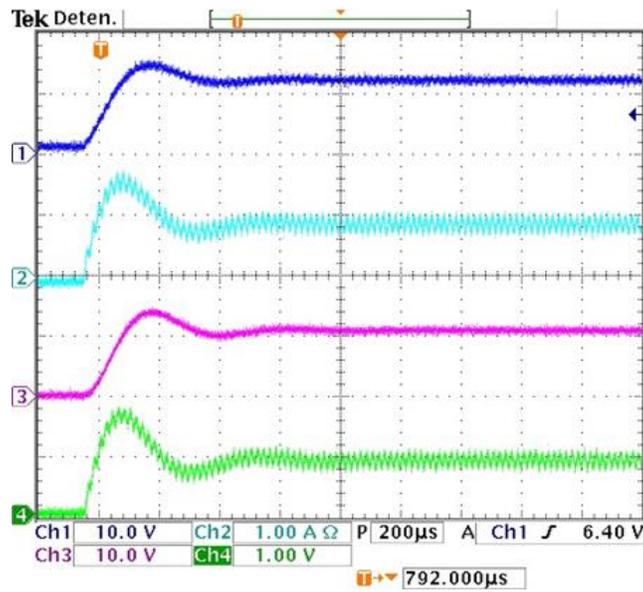


Figura 21 Transitorio del convertidor real y HIL con el método del punto medio a f_s de 50kHz. CH1 V_O convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_O convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 22 se muestra la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Heun con una frecuencia de conmutación de 50kHz. Mientras que la Figura 23 muestra las señales directamente desde el osciloscopio.

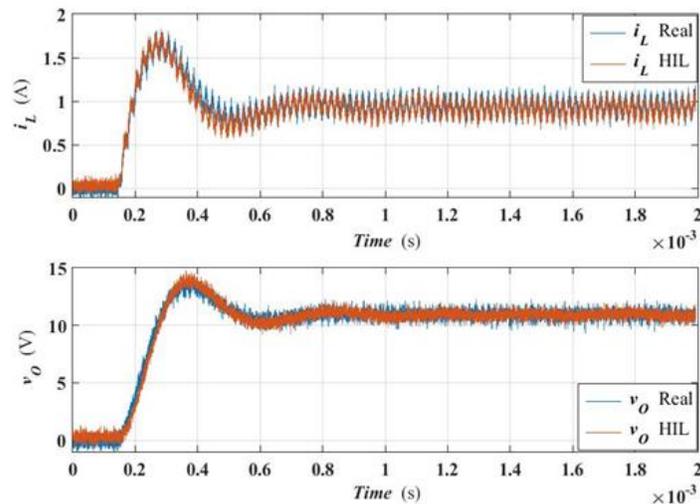


Figura 22 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Heun a una f_s de 50kHz.

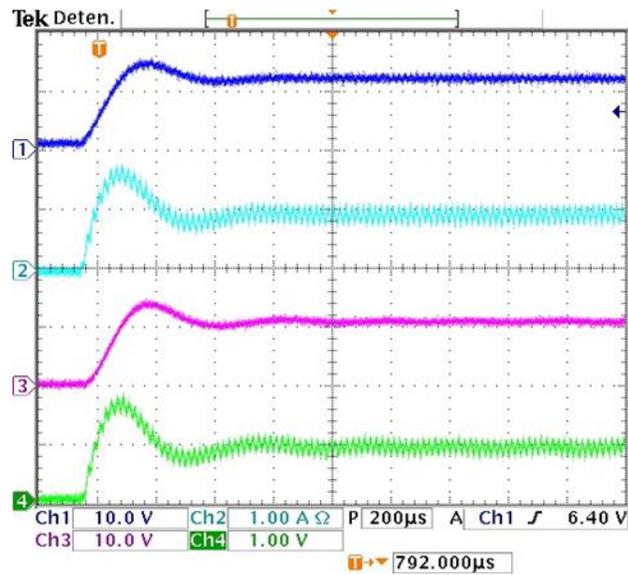


Figura 23 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Heun a f_s de 50kHz. CH1 V_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

En la Figura 24 se muestra la comparación del transitorio de corriente y de voltaje entre un convertidor real y el modelo del convertidor usando el método de Heun con una frecuencia de conmutación de 50kHz. La Figura 25 muestra las señales adquiridas en el osciloscopio.

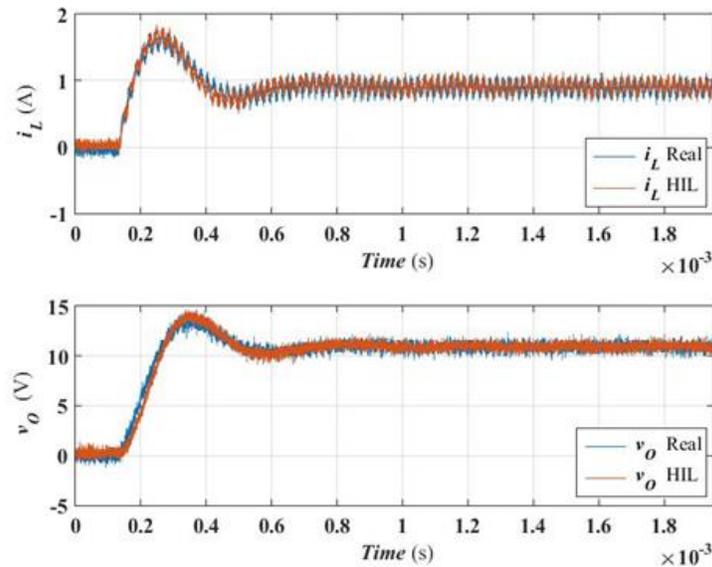


Figura 24 Respuesta transitoria del convertidor real vs HIL con el método de Runge Kutta a una f_s de 50kHz.

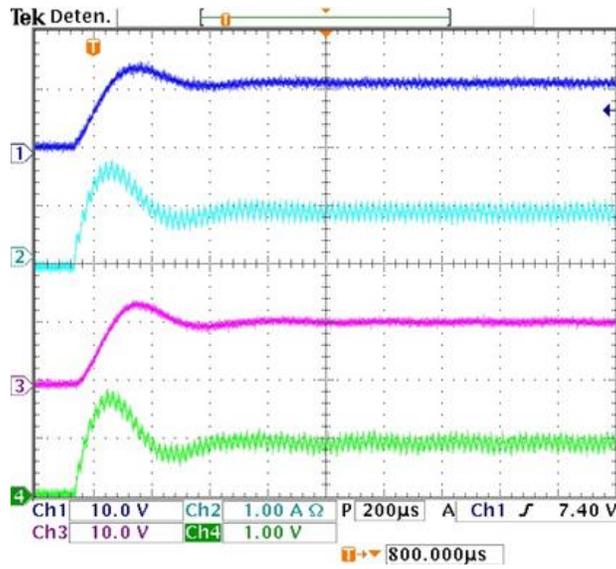


Figura 25 Transitorio del convertidor real y HIL con el método de Runge Kutta a f_s de 50kHz. CH1 V_o convertidor real, CH2 i_L convertidor real, CH3 V_o convertidor HIL y CH4 i_L convertidor HIL.

Nuevamente obteniendo los errores de cada método numérico, pero ahora con una frecuencia de conmutación (f_s) de 50kHz se obtuvo la Tabla. 3 con la cual se puede observar de manera más clara una comparación entre cada método numérico

Tabla 3.- Comparación entre el convertidor real y los modelos HIL con una f_s de 50kHz

Método	EMA V_o	EMA i_L
Euler	0.440902708	0.070655968
Punto medio	0.448815261	0.108716867
Heun	0.439157472	0.07177332
RK4	0.45856	0.096722

Capítulo 6. Resultados.

Además de los resultados obtenidos por las simulaciones con los diferentes métodos numéricos existe otro dato que es igualmente muy importante para analizar la eficacia de los diferentes métodos numéricos, el cual es la cantidad de recursos o carga computacional que requiere cada método para obtener los resultados y el tiempo que tarda en ejecutarse. La Tabla. 4 muestra el tiempo, los registros y los recursos de procesamiento de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés) que utiliza cada método numérico.

Tabla 4.- Comparación recursos utilizados y tiempo de solución requerido por cada método numérico.

Método	Registros	DSP	Total	Tiempo
Euler	2.3%	9.5%	7.2%	200ns
Punto medio	2.8%	16.8%	9.9%	325ns
Heun	2.8%	16.8%	9.4%	350ns
Runge-Kutta	4.05%	49.5%	16.7%	750ns

Capítulo 7 Análisis de Resultados

Un punto interesante a analizar acerca de los resultados obtenidos con esta tesis se ven reportados en la Tabla. 2 y 3 del capítulo 6 resultados. Estas tablas indican el error medio aritmético obtenido entre el simulador HIL desarrollado y un prototipo real de convertidor reductor. Se puede observar que si bien el método de Euler peor método numérico en cuanto a exactitud (siempre y cuando tengan el mismo tiempo de solución), es el método que contiene el menor error y esto es debido a que es la solución que tarda menos tiempo en encontrarse, por lo que tiene el tiempo de integración más bajo.

Otro punto importante a considerar es el error cuando la frecuencia de conmutación aumenta, es recomendable que el tiempo de solución de la simulación en tiempo real sea al menos 100 veces más pequeño que el periodo de conmutación del convertidor, por lo que una vez más el que presenta menor error trabajando a 100kHz es el método de Euler.

Sin embargo, con una frecuencia de integración de 50kHz la diferencia entre los métodos es menor que con 100kHz por lo que el método de Euler podría no ser la mejor opción para simulaciones con frecuencias de integración mas bajas.

Estos resultados muestran que aunque hay mejores métodos numéricos que el de Euler con respecto a su estabilidad y error, éste es el mejor método para sistemas HIL en donde el tiempo de integración debe de mantenerse pequeño y los recursos son limitados, como es el caso de los convertidores de potencia.

Aunque los resultados arrojan que el método de Euler es el mejor para altas frecuencias de conmutación los otros métodos también son capaces de resolver un sistema en tiempo real y pueden ser utilizados para otro tipo de aplicaciones donde el tiempo de integración no tenga que ser tan pequeño y los recursos no sean un impedimento en su implementación.

Capítulo 8 Conclusiones y trabajo a futuro

Por medio del desarrollo de este trabajo se obtiene una metodología para la implementación de convertidores de potencia en FPGA, utilizando un lenguaje de fácil aprendizaje como lo es LabVIEW® FPGA.

Como caso de estudio para realizar esta metodología se utilizó un convertidor reductor, se diseñó e implemento dicho convertidor con la finalidad de compararlo contra el sistema HIL obtenido y así obtener el error entre ambas.

Estas pruebas se realizaron en el transitorio del convertidor para poder evaluar de mejor manera el error entre la simulación y el convertidor real. De esta forma se determina que no existe mucha diferencia en los resultados obtenidos de la corriente del inductor y el voltaje de salida, porque son similares los resultados de acuerdo al MAE.

Estos resultados arrojan que el método de Euler es el que tiene un mejor desempeño y además utiliza menor cantidad de recursos de la FPGA, además, es el método que menos tarda en realizar las soluciones por lo tanto se puede llegar a más altas frecuencias de conmutación.

Como trabajos futuros se pretende realizar una mayor cantidad de modelos de convertidores conmutados unidos y estudiar su interacción para poder realizar sistemas más complejos, como vehículos eléctricos o micro redes. También se deben de explorar otras aplicaciones ajenas a la electrónica de potencia como puede ser, de plantas como reactores, intercambiadores de calor, etc.

Referencias bibliograficas

Referencias bibliográficas

1. Sarhadi, P.; Yousefpour, S. State of the art hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software. *Int. J. Dynam. Control.* 2015, 3, 470–479. [CrossRef]
2. Faruque, O.M.; Strasser, T.; Lauss, G.; Jalili-Marandi, V.; Forsyth, P.; Dufour, C.; Dinavahi, V.; Monti, A.; Kotsampopoulos, P.; Strunz, K. Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis. *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.* 2015, 2, 63–73. [CrossRef]
3. Faruque, O.M.; Dinavahi, V. Hardware-in-the-Loop Simulation of Power Electronic Systems Using Adaptive Discretization. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 1146–1158. [CrossRef]
4. Rezkallah, M.; Hamadi, A.; Chandra, A.; Singh, B. Real-Time HIL Implementation of Sliding Mode Control for Standalone System Based on PV Array Without Using Dumpload. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2015, 6, 1389–1398. [CrossRef]
5. Matar, M.; Paradis, D.; Iravani, R. Real-Time simulation of modular multilevel converters for controller hardware-in-the-loop testing. *IET Power Electron.* 2016, 9, 42–50. [CrossRef]
6. Vekic, M.S.; Grabic, S.U.; Majstorovic, D.P.; Čelanovic, I.L.; Čelanovic, N.L.; Katic, V.A. Ultralow Latency HIL Platform for Rapid Development of Complex Power Electronics Systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012, 27, 4436–4444. [CrossRef]
7. Rodríguez-Andina, J.J.; Valdés-Peña, M.D.; Moure, M.J. Advanced Features and Industrial Applications of FPGAs—A Review. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2015, 11, 853–864. [CrossRef]
8. Li, W.; Belanger, J. An Equivalent Circuit Method for Modelling and Simulation of Modular Multilevel Converters in Real-Time HIL Test Bench. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016, 31, 2401–2409.
9. Karimi, S.; Poure, P.; Saadate, S. An HIL-Based Reconfigurable Platform for Design, Implementation, and Verification of Electrical System Digital Controllers. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 1226–1236. [CrossRef] *Energies* 2020, 13, 373 19 of 19
10. Jiménez, Ó.; Lucía, Ó.; Urriza, I.; Barragan, L.A.; Navarro, D.; Dinavahi, V. Implementation of an FPGA-Based Online Hardware-in-the-Loop Emulator Using High-Level Synthesis Tools for Resonant Power Converters Applied to Induction Heating Appliances. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 2206–2214. [CrossRef]
11. Matar, M.; Iravani, R. FPGA Implementation of the Power Electronic Converter Model for Real-Time Simulation of Electromagnetic Transients. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2010, 25, 852–860. [CrossRef]
12. Wang, W.; Shen, Z.; Dinavahi, V. Physics-Based Device-Level Power Electronic Circuit Hardware Emulation on FPGA. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2014, 10, 2166–2179. [CrossRef]
13. Lucía, Ó.; Urriza, I.; Barragan, L.A.; Navarro, D.; Jiménez, Ó.; Burdío, J.M. Real-Time FPGA-Based Hardware-in-the-Loop Simulation Test Bench Applied to Multiple-Output Power Converters. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2011, 47, 853–860. [CrossRef]
14. Yan, Q.; Tasiu, I.; Chen, H.; Zhang, Y.; Wu, S.; Liu, Z. Design and Hardware-in-the-Loop Implementation of Fuzzy-Based Proportional-Integral Control for the Traction Line-Side Converter of a High-Speed Train. *Energies* 2019, 12, 4094. [CrossRef]
15. Math Works. Available online: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed on 26 October 2018).
16. National Instruments. Available online: <http://www.ni.com/es-mx.html> (accessed on 26 October 2018).
17. Rosa, A.; Silva, M.; Campos, M.; Santana, R.; Rodrigues, W.; Morais, L. SHIL and DHIL Simulations of Nonlinear Control Methods Applied for Power Converters Using Embedded Systems. *Electronics* 2018, 7, 241. [CrossRef]
18. Abbas, G.; Gu, J.; Farooq, U.; Abid, M.I.; Raza, A.; Asad, M.U.; Balas, V.E.; Balas, M.E. Optimized Digital Controllers for Switching-Mode DC-DC Step-Down Converter. *Electronics* 2018, 7, 412. [CrossRef]
19. Selvamuthukumar, R.; Gupta, R. Rapid prototyping of power electronics converters for photovoltaic system application using Xilinx System Generator. *IET Power Electron.* 2014, 7, 2269–2278. [CrossRef]

20. Matar, M.; Karimi, H.; Etemadi, A.; Iravani, R. A High Performance Real-Time Simulator for Controllers Hardware-in-the-Loop Testing. *Energies* 2012, 5, 1713–1733. [CrossRef]
21. Casolino, G.M.; Russo, M.; Varilone, P.; Pescosolido, D. Hardware-in-the-Loop Validation of Energy Management Systems for Microgrids: A Short Overview and a Case Study. *Energies* 2018, 11, 2978. [CrossRef]
22. Ponce-Cruz, P.; Molina, A.; MacCleery, B. *Fuzzy Logic Type 1 and Type 2 Based on LabVIEW—FPGA*, 1st ed. Springer: New York, NY, USA, 2016.
23. Wei Li, Member, IEEE, and Jean Bélanger, Member, IEEE, An Equivalent Circuit Method for Modelling and Simulation of Modular Multilevel Converter in Real-time HIL Test Bench
24. Fei Zhang and Wei Li, An Equivalent Circuit Method for Modeling and Simulation of Dual Active Bridge Converter Based Marine Distribution System, OPAL-RT Technologies, Montreal, Canada
25. Mahmoud Matar, Dominic Paradis, Reza Iravani, Real-time simulation of modular multilevel converters for controller hardware-in-the-loop testing
26. Chen Liu, Hao Bai, Rui Ma, Xinyue Zhang, Franck Gechter and Fei Gao, A Network Analysis Modeling Method of the Power Electronic Converter for Hardware-in-the-loop Application
27. Chen Liu, Hao Bai, Shengrong Zhuo, Xinyue Zhang, Rui Ma, and Fei Gao, Real Time Simulation of Power Electronic Systems Based on Predictive Behavior
28. D. C. Hopkins et al. (1998) A framework for developing power electronics packaging, Proc. 14th Annual Power Electronics Conference and Exposition, February 15–19, 1998, IEEE, New York, pp. 9–15
29. R. R. Tummala and E. J. Rymaszewski (1989) *Microelectronics Packaging Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York.
30. B. J. Baliga (ed.), (1988) *High Voltage Integrated Circuits*, IEEE Press, New York.
31. J. B. Jacobsen and D. C. Hopkins (2000) Optimally selecting packaging technologies and circuit partitions based on cost and performance, Applied Power Electronics Conference, New Orleans, LA, February 6–10, 2000, IEEE, New York.
32. Kazimierczuk, M.K. *Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters*, 1st ed.; JohnWiley and Sons: Chennai, India, 2008.

Anexos

Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Euler

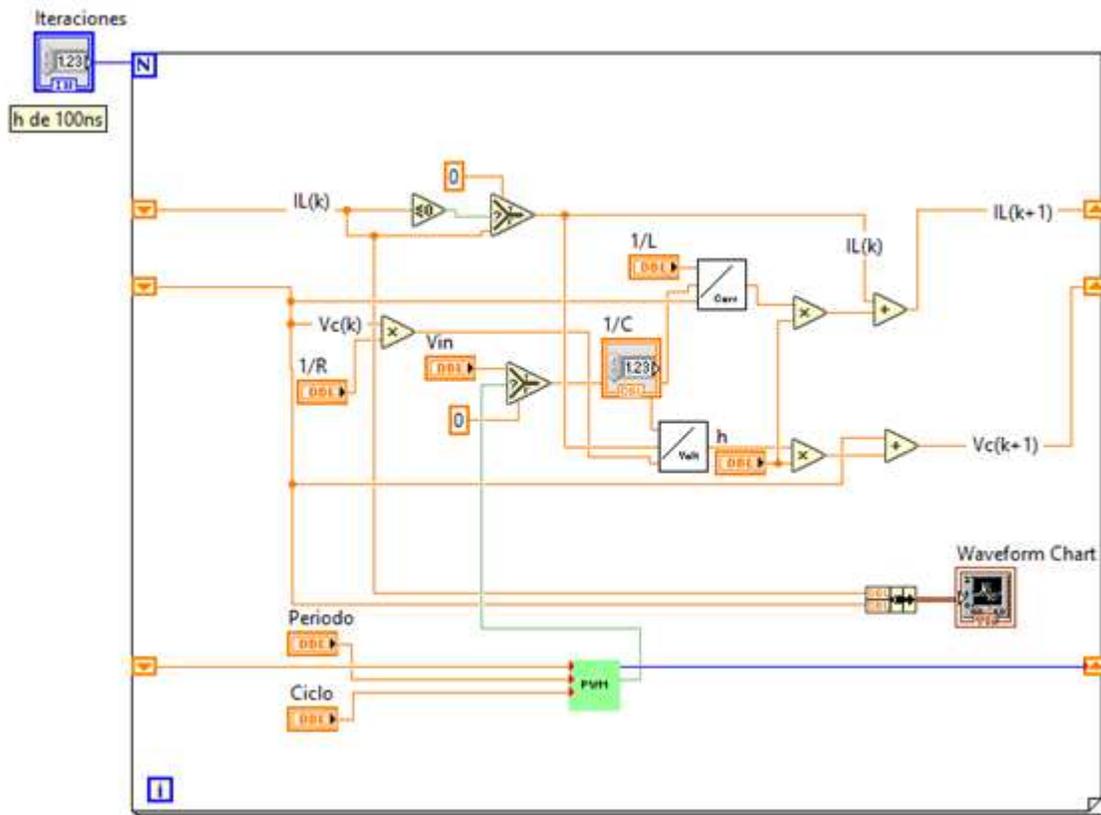


Figura 26 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Euler

Anexos

Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de punto medio

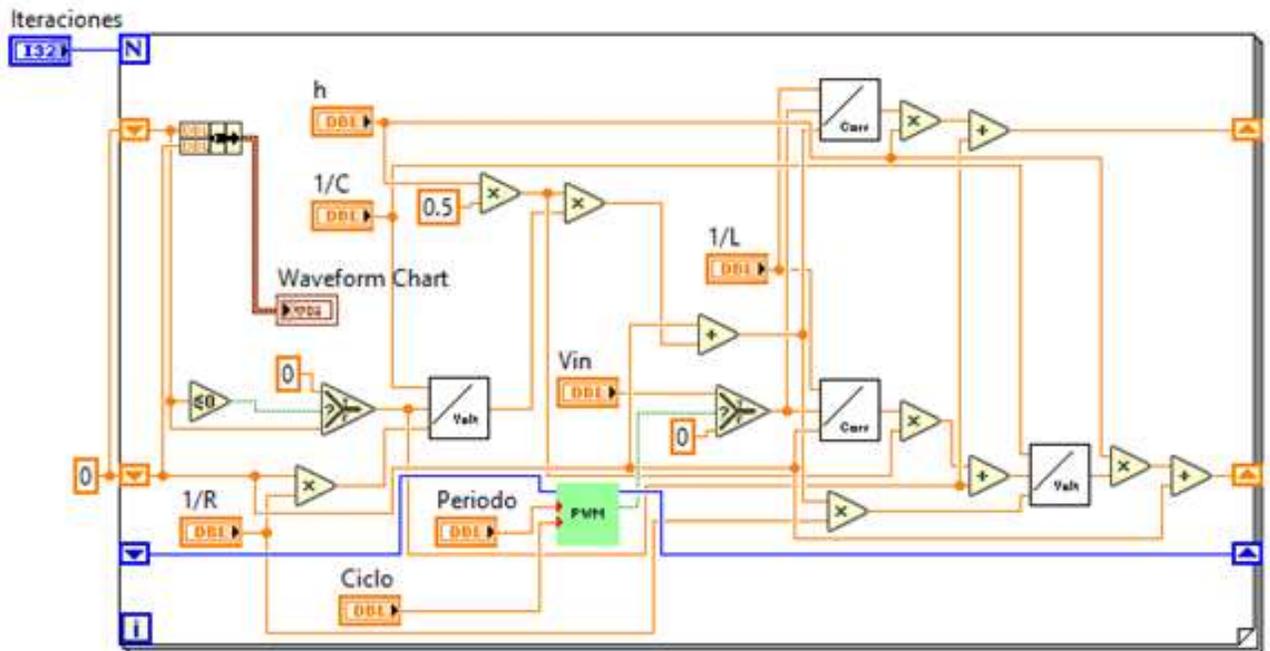


Figura 27 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de punto medio

Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Heun

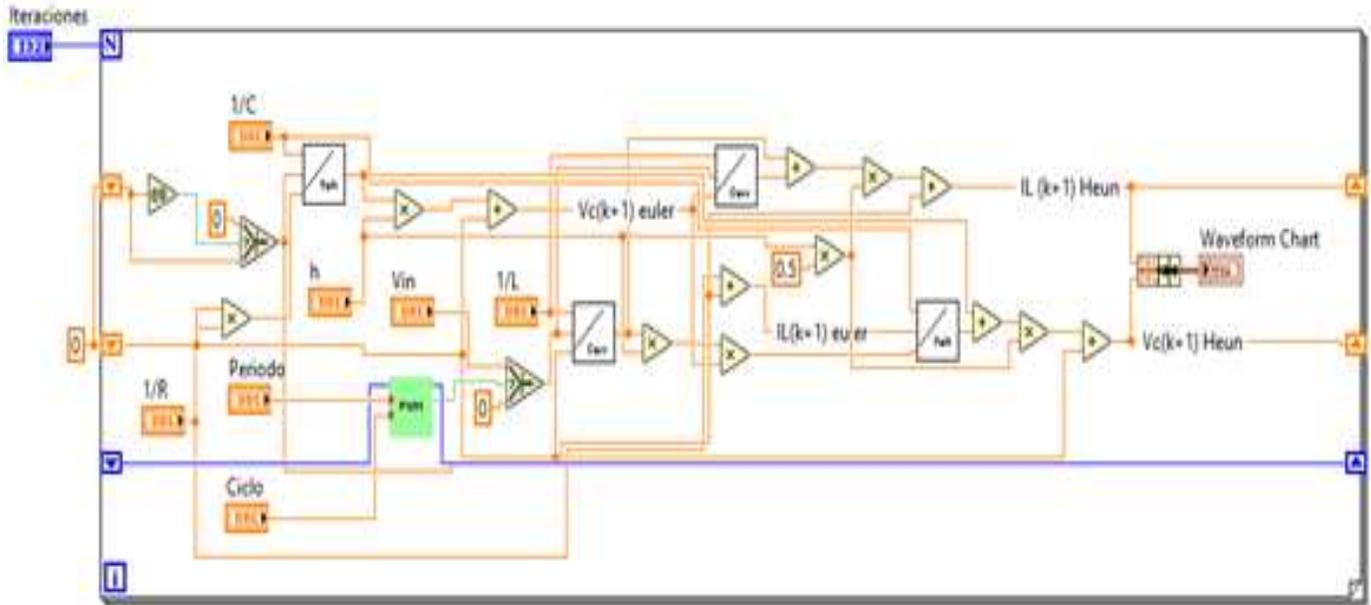


Figura 28 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Heun

Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Runge Kutta

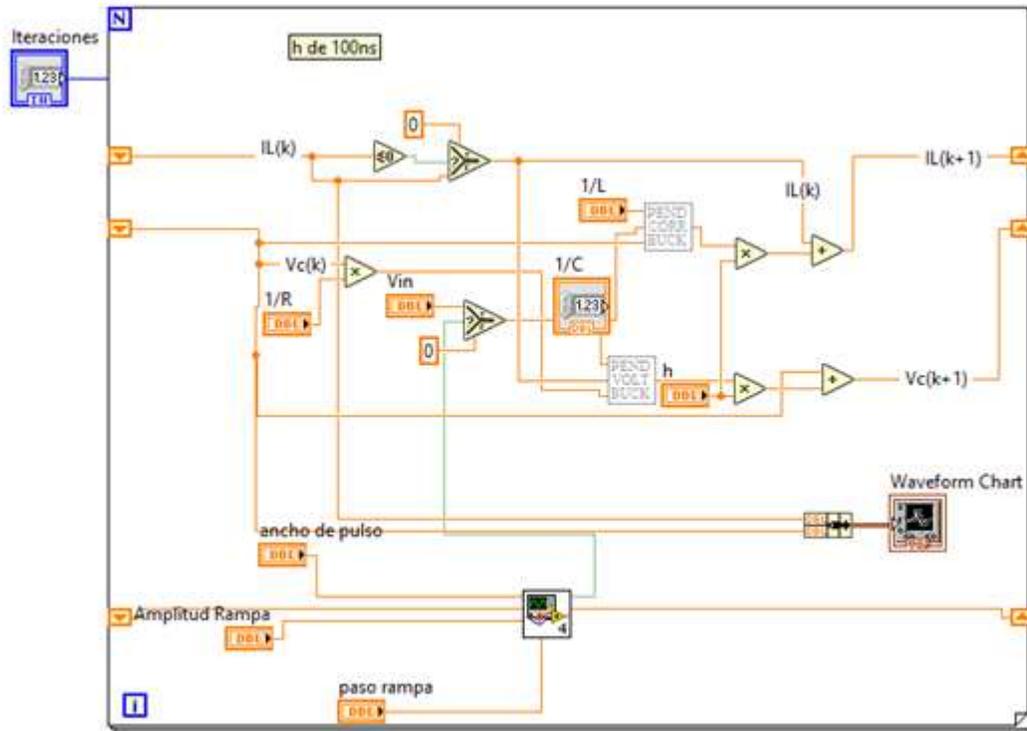


Figura 29 Diagrama de bloques para la simulación con HIL por el método de Runge Kutta