



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR DE POTENCIA
MONOFÁSICO CONTROLADO MEDIANTE CONTROL POR MATRIZ
DINÁMICA (DMC)**

AUTOR: ERAZO HUERA, PAOLO CESAR

DIRECTOR: DR. ARCOS AVILÉS, DIEGO GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2020



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "*IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR DE POTENCIA MONOFÁSICO CONTROLADO MEDIANTE CONTROL POR MATRIZ DINÁMICA (DMC)*", realizado por el señor **ERAZO HUERA PAOLO CESAR**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al Señor **ERAZO HUERA PAOLO CESAR** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de enero del 2020



Dr. Arcos Avilés Diego Gustavo

DIRECTOR

C.C. 1710879444



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ERAZO HUERA PAOLO CESAR**, con cédula de identidad N° 1003799069, declaro que este trabajo de titulación: "**IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR DE POTENCIA MONOFÁSICO CONTROLADO MEDIANTE CONTROL POR MATRIZ DINÁMICA (DMC)**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 15 de enero de 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Huera', is written over a horizontal line.

Erazo Huera Paolo Cesar

C.C. 1003799069



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **ERAZO HUERA PAOLO CESAR**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución, el presente trabajo de titulación ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR DE POTENCIA MONOFÁSICO CONTROLADO MEDIANTE CONTROL POR MATRIZ DINÁMICA (DMC)”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 15 de enero de 2020



Erazo Huera Paolo Cesar

C.C. 1003799069

DEDICATORIA

A mis padres Cesar Erazo y Lilia Huera, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida.

A mis hermanos, especialmente Jonathan y Mishel que me han apoyado en todo.

A mi increíble familia, que me ha ayudado en todo lo que he necesitado.

A mi abuelita, que esta en el cielo. Quien siempre, me impulso a seguir adelante en los estudios.

A mis sobrinos Valentina y Dylan, los cuales quiero mucho.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por todo lo que ha hecho en mi vida. A todos mis familiares, en especial a mi madre Lilia Huera y mi padre Cesar Erazo, por el amor y cariño que me han dado y por su apoyo incondicional, siempre incentivandome a cumplir mis sueños.

A mis hermanos, los cuales han sido una constante motivación en mi vida, para alcanzar mis sueños.

A mi familia, que siempre me ha apoyado y animado para conseguir las metas que me propongo.

A mi Universidad, en donde fueron muchas experiencias buenas y algunas malas, pero me han ayudado a crecer en todo aspecto de mi vida, me ha permitido conocer personas increíbles y me ha permitido viajar a dos países diferentes de intercambio.

A todos los profesores que contribuyeron en mi enseñanza personal y profesional.

A todos mis amigos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, que hicieron el camino más emocionante y me ayudaron en todo momento. Especialmente a Anthony Villa, Aurora Ñacato, Bryan Chauca, Danni Pereira, Dayana Silva, Marco Calderon, Milton Chasillacta.

A mi orientador Diego Arcos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por el apoyo y dedicación para el desarrollo del trabajo y en las aulas.

A mi mejor amiga Karen Guevara, por el amor y cariño diario. Gracias por hacerme una persona mejor.

A la Pontificie Universidad Catolica de Valparaiso y Universidade Federal do Río de Janeiro, las cuales me han permitido realizar un intercambio. Estas experiencias en Chile y

Brasil me han ayudado mucho en mi vida académica y personal. También conocí a personas, que hicieron mucho más placentero la estancia.

A la familia que hacen parte del laboratorio de Fuentes Alternativas de Energía (LAFAE) y el Laboratorio de Eletrónica de Potencia (ELEPOT) pertenecientes al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica de la Universidade Federal do Río de Janeiro, especialmente al Profesor Robson Dias y el Profesor Carlos Duarte. Así también a Lauro Neto, João Amaral, Armando Ferreira, Gleydson Neves y André Alves, los cuales me ayudaron en el desarrollo del trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	iii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iv
AUTORIZACIÓN.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia.....	4
1.3 Alcance.....	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
2.1 Celda Solar	12
2.2 Módulo Fotovoltaico	13
2.3 Extractor de máximo punto de potencia del panel solar	15
2.4 Convertidor elevador DC/DC (Boost).....	17
2.5 Inversor monofásico	18

2.5.1 Inversor monofásico puente de onda completa	19
2.5.2 Modelo matemático del inversor monofásico puente completa	20
2.5.3 Modulación.....	20
2.6 Control del inversor monofásico	21
2.6.3 Modelo matemático del Control por Matriz Dinámica (DMC)	24
2.7 Hardware in the Loop (HIL)	28
CAPÍTULO III DISEÑO DEL MPPT Y CONVERTIDOR BOOST	30
3.1 Implementación del algoritmo de MPPT	30
3.2 Dimensionamiento del conversor Boost.....	31
CAPÍTULO IV DISEÑO Y CONTROL DEL INVERSOR.....	35
4.1 Especificaciones del inversor monofásico puente onda completa	36
4.2 Diseño del filtro de salida del inversor.....	36
4.3 Diseño del controlador DMC para el inversor	39
4.3.1 Modelo de proceso	39
4.3.2 Ley de control.....	41
4.3.3 Simulación del controlador DMC	41
4.3.4 Respuesta a referencia sinusoidal.....	45
4.5 Simulación del inversor monofásico	47
4.6 Resultados de simulación	48
CAPÍTULO V IMPLEMENTACIÓN DEL INVERSOR MONOFÁSICO Y	
CONTROL DMC	50
5.1 Implementación del inversor monofásico puente completa	50
5.2 Implementación del controlador.....	52
5.3 Análisis de Resultados	54

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES	61
RECONOCIMIENTOS	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Generación de Electricidad en Brasil (GWh)</i>	8
Tabla 2. <i>Capacidad Instalada de Generación de Electricidad (MW)</i>	9
Tabla 3. <i>Factor de Capacidad (%)</i>	9
Tabla 4. <i>Costo de Generación de Electricidad Solar</i>	11
Tabla 5. <i>Parámetros del inversor monofásico</i>	36
Tabla 6. <i>Valores de g_i</i>	40
Tabla 7. <i>Parámetros de simulación</i>	48
Tabla 8. <i>Desempeño del controlador DMC</i>	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Factor de capacidad.	10
Figura 2. Capacidad de potencia global, generación fotovoltaica aislada	10
Figura 3. Reducción de Precios de Módulos Solares Versus Producción de Electricidad.....	11
Figura 4. Circuito Eléctrico Equivalente del panel Solar	12
Figura 5. Representación de la celda solar y panel fotovoltaico	13
Figura 6. Curvas de Intensidad vs Tensión y Potencia vs Tensión del módulo fotovoltaico JKM300M-72	14
Figura 7. Curva demostrativa del comportamiento de potencia generada de un panel solar aplicado el algoritmo P&O.	16
Figura 8. Diagrama de flujo de la técnica P&O	16
Figura 9. Circuito del conversor Boost	17
Figura 10. Topología Inversor puente onda completa	19
Figura 11. Modulación SPWM	21
Figura 12. Tipos de controladores para convertidores de potencia Fuente: (Rodríguez Cortes, 2012)	22
Figura 13. Estrategia DMC Fuente: (Bordons, 2007)	23
Figura 14. Respuesta de una planta, ante una entrada escalón.....	24
Figura 15. MPPT y conversor Boost propuestos.	30
Figura 16. Implementación del algoritmo P&O	31
Figura 17. Implementación del MPPT y convertidor Boost	32
Figura 18. Curvas características del módulo fotovoltaico empleado el MPPT	33
Figura 19. Valores de entrada y salida del convertidor Boost	34
Figura 20. Valores de Potencia de entrada y salida del convertidor Boost	34

Figura 21. Inversor monofásico y control DMC propuestos. 3.....	35
Figura 22. Filtro LC	37
Figura 23. Diagrama de la función de transferencia del filtro LC con carga.....	38
Figura 24. Respuesta ante una entrada escalón a la planta.....	40
Figura 25. Diagrama de flujo del algoritmo de la ley de control DMC	42
Figura 26. Respuesta para diferentes parámetros de ponderación.	44
Figura 27. Respuesta ante perturbaciones	45
Figura 28. Respuesta ante señal de referencia sinusoidal	46
Figura 29. Respuesta ante perturbaciones	46
Figura 30. Simulación del inversor monofásico.....	47
Figura 31. En azul la salida de tensión y en rojo la referencia, simulada.	49
Figura 32. Typhoon HIL 402	51
Figura 33. Implementación del inversor monofásico en el Typhoon HIL 402	52
Figura 34. dSPACE.....	52
Figura 35. Programación del controlador DMC en la dSPACE	53
Figura 36. Conexión del Typhoon HIL con la dSPACE.....	53
Figura 37. Conexión física del Typhoon HIL con la dSPACE	54
Figura 38. En azul la salida de tensión y en rojo la referencia.....	54
Figura 39. Salida de tensión del inversor monofásico	55
Figura 41. Interfaz Typhoon HIL.....	55
Figura 42. Scopes del Typhoon HIL	56
Figura 43. Variación de la carga a 6 Ω	57
Figura 44. Variación de la carga a 25 Ω	57
Figura 45. Variación de la carga a 100 Ω	58

Figura 46. Referencia de 0.10 p.u a 1 p.u.....	59
Figura 47. Referencia de 0.25 p.u a 1 pu.....	59
Figura 48. Referencia de 0.50 p.u a 1 pu.....	60
Figura 49. Rechazo de perturbaciones ante una entrada escalón	60

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acrónimos

MPPT	Seguidor de punto de máxima potencia
P&O	Perturba y Observa
SPWM	Modulación senoidal por ancho de pulso
DMC	Control por matriz dinámica

Símbolos

λ	factor de ponderación para incrementos de control
N	número de puntos del horizonte de predicción
N_u	número de puntos del horizonte de control
$W(t + j)$	referencias futuras
$y(t), y_m$	salida medida
$u(t)$	señal de control
$u(t + j)$	señal de control futura
\hat{y}	salida predicha
f	respuesta libre
$\hat{y}(t + j t)$	Valor esperado de $y(t + j)$ con información disponible en el instante t

RESUMEN

Los inversores desempeñan un papel importante para la implementación de las energías renovables, por ejemplo, posibilita la conversión de corriente continua en alterna para la conexión de las fuentes eólicas y solares a redes eléctricas convencionales.

La energía solar es una fuente renovable de energía, cuyo beneficio, además de reducir el crecimiento de uso de fuentes no renovables de electricidad, es el de poder suministrar energía a cargas en localidades aisladas, sin conexión con las redes eléctricas convencionales.

El presente documento aborda la implementación del algoritmo de control por Matriz Dinámica (*Dynamic Matrix Control - DMC*), en un inversor monofásico para su aplicación en un sistema de generación fotovoltaica aislada. La validación del control se realiza por medio del esquema Controller Hardware in the loop (CHIL), donde el sistema es modelado por el simulador en tiempo real Typhoon HIL y controlado por el microprocesador Rapid Control Prototyping dSPACE. El DMC es un tipo de control predictivo de la familia del Control Predictivo por modelo (*Model Predictive Control - MPC*), ampliamente utilizado en la industria debido a su capacidad para controlar grandes sistemas multivariables, así como su adaptación a las restricciones de los sistemas.

PALABRAS CLAVES:

- **INVERSOR MONOFÁSICO**
- **CONTROL POR MATRIZ DINÁMICA (DMC)**
- **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**
- **CONTROL PREDICTIVO POR MODELO**

ABSTRACT

Inverters have an important role in the implementation of renewable energies, for instance, inverters enable the conversion of direct current into alternating current for the connection of wind and solar sources to conventional electricity networks.

Solar energy is a renewable energy source which has a lot of benefits, such as reducing the growth of the use of non-renewable energy sources and supplying power to loads in isolated locations (i.e., locations without a connection to conventional electricity network).

This document addresses the implementation of the Dynamic Matrix Control (DMC) algorithm, in a single-phase inverter to be applied in an isolated photovoltaic generation system. The control validation is performed through the Controller Hardware-in-the-Loop (CHIL) scheme, where the system is modeled by the simulator Typhoon HIL in real time and controlled by a Rapid Control Prototyping dSPACE microprocessor. The DMC is a type of predictive control of the Model Predictive Control (MPC) family which is widely used in the industry due to its ability to control large multivariable systems, as well as, its high adaptation to the system's restrictions.

KEY WORDS:

- **SINGLE-PHASE INVERTER**
- **DYNAMIC MATRIX CONTROL (DMC)**
- **PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**
- **MODEL PREDICTIVE CONTROL**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La generación de energía eléctrica debe comenzar desde una fuente de energía primaria como un combustible o un flujo. Estos generalmente se convierten en corriente eléctrica que transmite energía a la red. Las centrales eléctricas son la tecnología de conversión de energía más utilizada para crear electricidad a partir de energía primaria. Si bien, es posible tener generación de corriente alterna y continua, casi toda la electricidad que se produce con un generador es de corriente alterna (Calgary, Electrical generation, 2019).

A nivel mundial, el uso de la electricidad está en aumento a medida que se desarrollan nuevas economías importantes en lugares como China y la India. Esta necesidad de electricidad ha desviado la atención de la humanidad hacia las energías renovables. Ésta puede ser producida de una gran variedad de fuentes que incluye la eólica, solar, hidráulica, mareomotriz, geotérmica y la biomasa (Horst, Bondarik, & Pilatti., 2018). Mediante el incremento en el uso de energías renovables para satisfacer las necesidades de energía, la Unión Europea (UE) reduce dependencias de combustibles fósiles importados hacia su producción de energía más sostenible. Se debe pensar en esas fuentes como una oportunidad estratégica para depender menos del combustible fósil y de las grandes centrales hidroeléctricas, descentralizar el sector de energía eléctrica, usar el enorme potencial de energía solar, eólica y de la biomasa; y crear una industria respetuosa con el medio ambiente. Cabe citar el ejemplo de la Unión Europea, que establece una meta de proveer el 20% de su consumo total por medio de fuentes renovables

hasta 2020, de forma que los países miembros puedan cumplir sus objetivos (Commission, 2019):

- Que van del 10% en Malta al 49% en Suecia:
- Al menos el 10% de los combustibles del sector del transporte provengan de fuentes renovables.

En estos últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías que han permitido reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos (Jäger-Waldau, 2017). Las principales limitantes en la generación eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos son que presentan características de variabilidad, tanto en temperatura como en radiación solar, lo cual provoca una baja eficiencia en la transformación de energía proveniente del sol a energía eléctrica en este tipo de sistemas. Las características de los módulos fotovoltaicos de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V), son no lineales debido a que la potencia de salida varía en función de las condiciones climáticas (Donoso, 2016).

Un generador fotovoltaico esta formado de uno o más modulos fotovoltaicos combinados con un inversor y/o conversor DC/DC que utilizan la energía del sol para generar electricidad. La electricidad producida a partir de un panel solar está en forma de corriente continua (DC). Aunque muchos dispositivos utilizan electricidad en forma de corriente continua, como es el caso del celular o computadora portátil, están diseñados para funcionar con la red eléctrica que proporciona corriente alterna (Calgary, Photovoltaic system, 2019), los paneles fotovoltaicos generan corriente continua (DC), según las diferentes configuraciones, módulos o arreglos y de acuerdo a la aplicación de estos, será necesario elevar o reducir el voltaje y/o llevarlo a una señal de corriente alterna (AC) estándar a través de un inversor (Donoso, 2016). En la generación de energía eléctrica, a través de paneles fotovoltaicos, existen dos tipos de conexión:

con conexión a red (on-grid) y aislados (off-grid, stand-alone). Los primeros están conectados a la red, generan energía eléctrica en paralelo con el distribuidor de energía eléctrica. Los sistemas aislados son aquellos que trabajan desconectados de la red eléctrica. El diseño de sistemas independientes solar-PV, depende de la carga requerida para el uso previsto, constan de un panel fotovoltaico (PV) como tecnología de captación de la energía, una batería como dispositivo de almacenamiento, un controlador de carga como unidad de control y un convertidor DC/AC para cargas AC. Los sistemas fotovoltaicos aislados se utilizan por lo general en las zonas rurales o remotas, donde la red eléctrica no es accesible (Mohitha A.T, 2015).

Por otro lado, debido a la naturaleza de la energía solar y de los convertidores de potencia, se requieren técnicas de control avanzado que garanticen la estabilidad del sistema. En la actualidad existen diversas técnicas y métodos de control avanzados para convertidores de potencia, entre los más comunes se puede nombrar: control por histéresis, control lineal, control en modo deslizante (SMC – *Sliding Mode Control*), control predictivo por modelo (MPC – *Model Predictive Control*) e inteligencia artificial (Rodriguez & Cortes, 2012). Los convertidores de potencia requieren respuestas de control del orden de decenas a cientos de microsegundos para funcionar correctamente. Sin embargo, el poder computacional y el avance tecnológico de los microprocesadores modernos han aumentado dramáticamente lo que ha permitido el desarrollo de tarjetas electrónicas dedicadas (FPGA - *Field-Programmable Gate Array*) y microcontroladores. Esto ha hecho posible implementar estrategias de control más complejas e inteligentes, en el área de electrónica de potencia, como MPC, en plataformas de hardware de control estándar. MPC es una estrategia de control no lineal que utiliza explícitamente el modelo del sistema a controlar. En general, MPC define la acción de control, la cual será controlada por un microcontrolador para minimizar una función de costo que

describe el comportamiento deseado del sistema. Esta función de costo compara la salida del sistema predicha con una referencia. Las salidas previstas se calculan a partir del modelo del sistema. En general, para cada tiempo de muestreo, el controlador MPC calcula una secuencia de acción de control que minimiza la función de costo, pero solo el primer elemento de esta secuencia se aplica al sistema. Los métodos MPC se clasifican según el tipo de problema de optimización, es decir, si se trata de un problema de optimización de enteros o no. Por otro lado, en la primera generación de controladores predictivos se encuentran: el controlador predictivo de modelo heurístico (MHPC), el controlador por matriz dinámica (DMC), entre otros. Se puede considerar que el DMC está ampliamente introducido en la industria, ya que proporciona un buen control de sistemas multivariables sin restricciones (Gutierrez, 2019).

1.2 Justificación e Importancia

Los inversores juegan un papel importante en las energías renovables, posibilitan la conversión de corriente continua en alterna para la conexión de las fuentes solares a redes eléctricas convencionales. La energía solar es prácticamente inagotable y no contaminante, lo que puede contribuir a frenar el crecimiento de fuentes no renovables de electricidad, además de poder suministrar cargas en locales aislados, sin conexión con la red eléctrica. El costo de instalación del sistema solar fotovoltaico ha disminuido en los últimos años por lo cual es factible la realización del proyecto.

Dado el gran potencial de energía solar en el mundo, el presente proyecto de investigación mediante la implementación del sistema pretende evaluar varias características y requerimientos técnicos del inversor de potencia monofásico para un sistema fotovoltaico aislado, mediante el uso de la técnica de control DMC. El diseño de este sistema supone una gran ventaja frente a otro tipo de controladores convencionales para inversores, entre estas

ventajas se puede nombrar: respuesta dinámica rápida, ausencia de modulador explícito, fácil inclusión de no linealidades y restricciones del sistema, posibilidad de incorporar un control anidado mediante un solo lazo de control (Suquillo & Alex, 2019). Estas características de las etapas de control y conversión de potencia, son favorables para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos ante la naturaleza no lineal de la energía solar.

El desarrollo del trabajo busca promover la investigación en las áreas de control predictivo, electrónica de potencia y fuentes alternativas de energía que aporta una base científica relevante en estas áreas de interés dadas las circunstancias a las que el país y el mundo se enfrenta con la ampliación de la matriz energética basada en energías renovables (SENPLADES, n.d.) y el creciente uso de estas a nivel mundial.

Por otra parte, el desarrollo de nuevos vínculos y conexiones a nivel internacional es una actividad necesaria para las universidades ya que todos estos precedentes extienden la visión profesional para los estudiantes, así como también, demuestran y amplían los conocimientos y capacidades que la universidad imparte a través de un espacio activo en el campo internacional. El concretar un vínculo con un país industrialmente destacado como Brasil, permite alcanzar un intercambio de conocimientos y proyectos con dicho país que fomenta la competitividad adecuada para la era actual.

Un factor importante de la acreditación de una universidad es la movilidad estudiantil, facilita la aplicación a becas e intercambios internacionales e incrementa las oportunidades de empleo a nivel internacional. Por los motivos mencionados anteriormente, el desarrollo de este proyecto se va a realizar con la colaboración de la Universidad Federal de Río de Janeiro, se adjunta la carta de aceptación en el Anexo I, donde la Universidad de las Fuerza Armadas ESPE figura como promotor del proyecto de investigación. Además, se debe indicar que este proyecto

es parte del proyecto titulado “*MIRA-ESTE: Specific, innovative microgrids solutions (accounting for environmental, social, technological and economics aspects) for isolated rural areas of Ecuador*” que se desarrollara en conjunto con la Universidad KU Leuven de Bélgica financiado por VLIR-USO SI 2020.

1.3 Alcance

Se propone los alcances a cumplir en el proyecto de investigación, de esta manera se definen criterios, parámetros que limitan el desarrollo del trabajo y abarcara los siguientes puntos:

- Modelamiento matemático del panel solar.
- Diseño del extractor de máximo punto de potencia del panel solar.
- Diseño de un convertidor elevador DC/DC.
- Implementación del inversor de potencia monofásico, la salida del inversor en AC será 105 - 115 Vrms a 57 - 63 Hz. El contenido armónico (THD) debe ser inferior al 5% de acuerdo a las normas de calidad de energía eléctrica.
- Implementación del sistema de control DMC para el lazo de control en el inversor.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Implementar un inversor de potencia monofásico controlado mediante control por matriz dinámica (DMC) para la aplicación a un sistema de generación fotovoltaica aislada.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el extractor de máximo punto de potencia del panel solar.
- Diseñar el convertidor Boost DC/DC.

- Implementar el inversor monofásico mediante el algoritmo de control por matriz dinámica (DMC).
- Realizar mediciones del THD y analizar que este dentro de los parámetros de las normas de calidad de la energía.
- Analizar las respuestas del inversor monofásico ante variaciones de carga y perturbaciones.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La creciente demanda de las necesidades por energía eléctrica, con sus consecuentes impactos socio ambientales, ha aumentado el enfoque en el uso de fuentes renovables, principalmente eólica y solar (Calgary, Electrical generation, 2019). Estas fuentes brindan la oportunidad estratégica de reducir la dependencia de los combustibles fósiles no renovables, aumentar la generación distribuida y fomentar la industria de la sostenibilidad.

Actualmente Brasil es un referente entre los países sudamericanos en cuanto a generación de energía (IRENA, 2019), por tal motivo se realizó un estudio comparativo basado en la capacidad de generación y consumo anual de las diferentes fuentes de energía.

Por medio de la Tabla 1 se puede comparar la generación hidrotérmica con las fuentes eólicas y solares.

Tabla 1.
Generación de Electricidad en Brasil (GWh)

Año/Tipo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hidráulica	80.703	82.459	84.294	86.018	89.193	91.650	96.925	100.275
Eólica	927	1.425	1.892	2.202	4.888	7.633	10.124	12.283
Solar	1	1	2	5	15	21	24	935
Térmica	29.689	31.243	32.778	36.528	37.827	39.563	41.275	41.628

Fuente: (Energética, 2018)

Por medio de la Tabla 2 Brasil.

Tabla 2, se puede observar la capacidad instalada de generación de esas fuentes en Brasil.

Tabla 2.

Capacidad Instalada de Generación de Electricidad en Brasil (MW)

Año/Tipo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hidráulica	403.289	428.333	415.342	390.992	373.439	359.743	380.911	370.906
Eólica	2.248	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626	33.489	42.373
Solar	-	-	-	2	3	8	26	650
Térmica	106528	94653	125610	165165	195919	190391	154524	164061

Fuente: (Energética, 2018)

La Tabla 3 muestra el factor de capacidad en Brasil (FC), obtenido por la relación de generación de electricidad (Tabla 1) y el potencial de generación de capacidad instalada (Tabla 2) Brasil.

Tabla 2).

Tabla 3.

Factor de Capacidad en Brasil (%)

Año/Tipo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hidráulica	57,05	59,30	56,25	51,89	47,80	44,81	44,86	42,22
Eólica	27,68	21,67	30,47	34,09	28,52	32,34	37,76	39,38
Solar	-	-	-	4,57	2,28	4,35	12,37	7,94
Térmica	40,96	34,58	43,75	51,62	59,12	54,94	42,74	44,99

Fuente: Elaboración Propia con Base en (Energética, 2018).

En la Figura 1, se muestra el aumento en el factor de capacidad de las fuentes eólicas y solares a lo largo de los años, esto infiere en la contribución del desarrollo de tecnologías que proporcionan una mayor eficiencia de conversión de estas fuentes en electricidad.

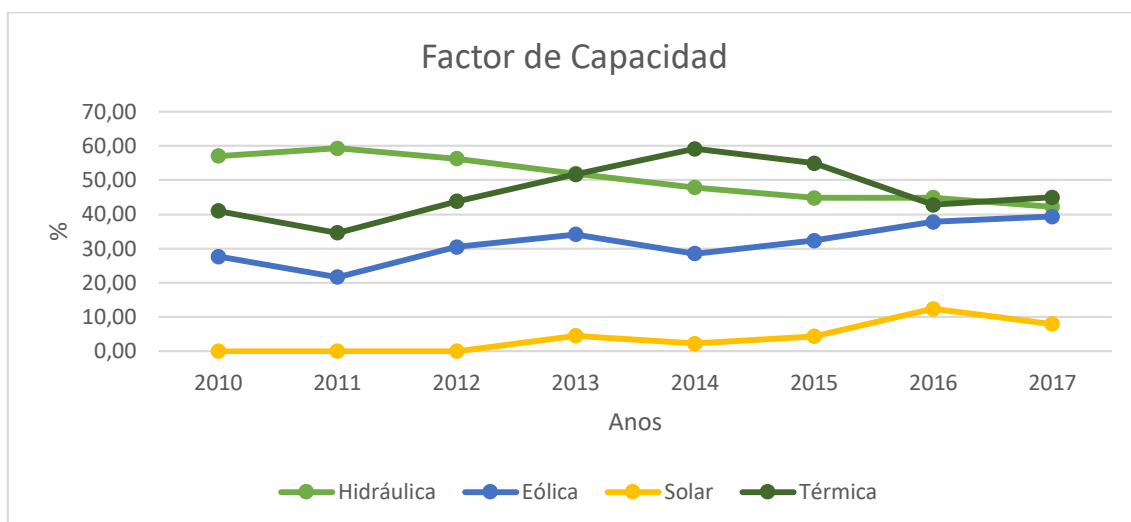


Figura 1. Factor de capacidad.

Así también, en la Figura 2 se puede observar que la generación fotovoltaica aislada ha ido en aumento cada año en el mundo. Y en comparación con 2008, en 2018 hubo un incremento de casi 12 veces. Esto posibilita a la investigación de nuevas tecnologías, en los sistemas fotovoltaicos como es el caso de este trabajo.

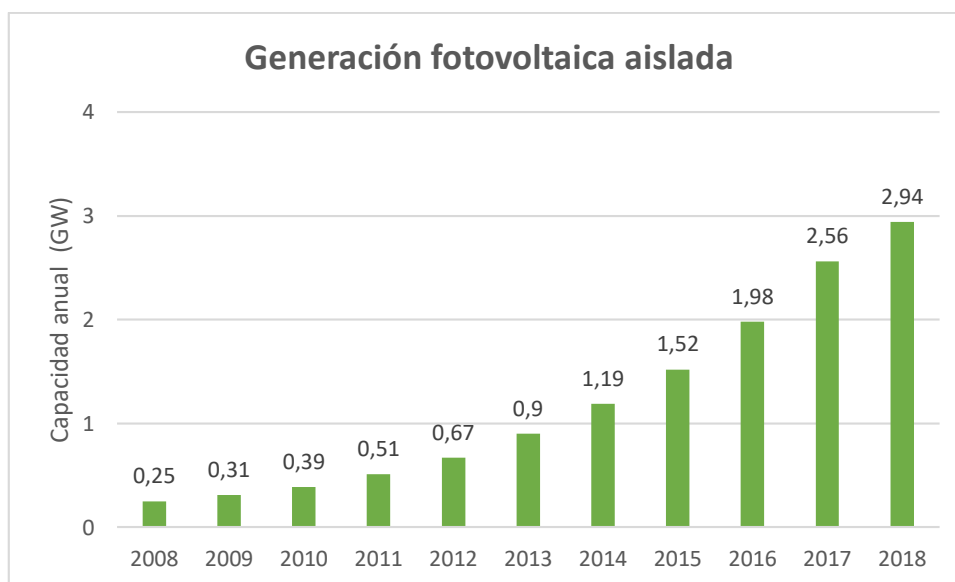


Figura 2. Capacidad de potencia global, generación fotovoltaica aislada
Fuente: (Agency, 2019)

Se han desarrollado nuevas tecnologías en los últimos años, que han reducido los costos de los sistemas fotovoltaicos, como se muestra en la Tabla 4, que incluye pronósticos hasta 2050. Y en comparación con 2010, en 2018 hubo una reducción en los costos para la generación de energía solar de casi 4 veces, mientras que las estimaciones indican que para 2050, se producirá una caída de 10 veces.

Tabla 4.
Costo de Generación de Electricidad Solar

	2010	2018	2030	2050
Solar PV (US\$/kW)	4.621	1.210	340 - 834	165 - 481

Fuente: (Agency, 2019).

En la Figura 3, se puede observar la caída en los precios de los módulos solares de 1975 a 2017 (Jäger-Waldau, 2017), esto proporciona una mayor inserción de energía solar fotovoltaica en los sistemas de potencia.

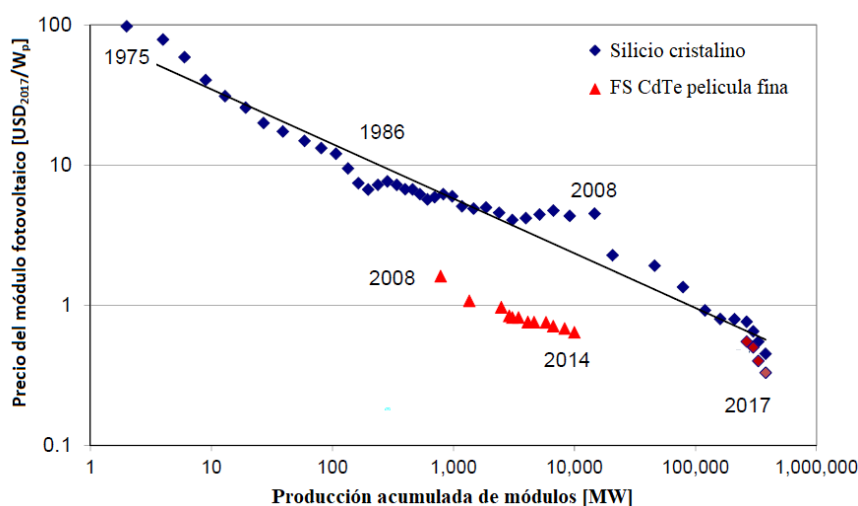


Figura 3. Reducción de Precios de Módulos Solares Versus Producción de Electricidad

En este capítulo se presenta los dispositivos empleados en un sistema fotovoltaico aislado: la celda solar que transforma la energía solar en electricidad, el convertidor elevador DC/DC que incrementa el valor de tensión del panel fotovoltaico y el inversor AC/DC que permite la conexión a los dispositivos eléctricos.

2.1 Celda Solar

Es la responsable de la conversión de la energía solar en electricidad, existen diferentes tipos de células solares y su rendimiento depende del semiconductor utilizado. Los semiconductores más utilizados son: el silicio, selenio, entre otros. El silicio es el más utilizado debido a su abundancia en la tierra.

El modelo matemático que describe una celda solar, fue basado en el circuito equivalente del modelo de un diodo, mostrado en la Figura 4.

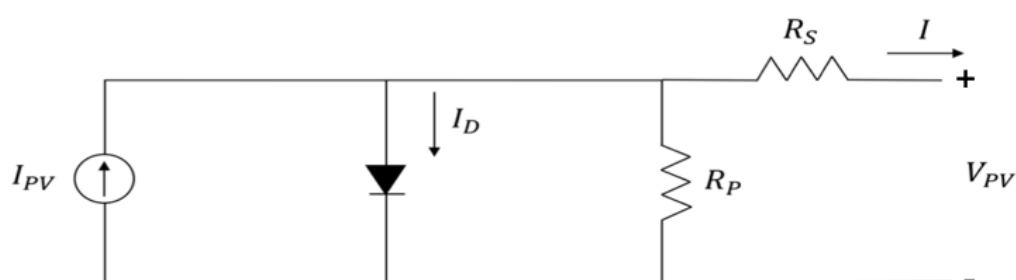


Figura 4. Circuito Eléctrico Equivalente del panel Solar

La célula solar puede ser modelada por las siguientes ecuaciones (Ida, 2019):

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\frac{(V_{PV} + I \cdot R_S)}{n k T_c}} - 1 \right] - \frac{(V_{PV} + I R_S)}{R_P} \quad (2.1)$$

Donde:

V_{PV} : Tensión de salida de la celda solar (V);

I : Corriente de salida de la celda solar (A);

I_{PV} : Corriente foto generada de la celda solar (A);

I_0 : Corriente inversa de saturación (A);

R_S : Resistencia en serie (Ω);

R_P : Resistencia en paralelo (Ω);

q : Carga del electrón (-1.602×10^{-19} C);

k : Constante de Boltzmann (1.380649×10^{-23} J/K);

T_C : Temperatura ambiente (K);

n : Factor de calidad de la juntura p.

De la ecuación (2.1), se puede observar que la corriente foto generada del panel solar varía en relación, a la variable externa como la temperatura, así como variables internas que componen la celda solar.

2.2 Módulo Fotovoltaico

Como se puede observar en la Figura 5, el módulo fotovoltaico es una composición de celdas solares.

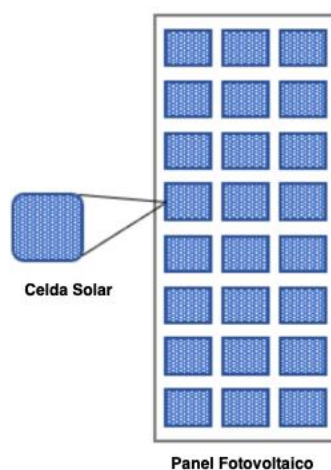


Figura 5. Representación de la celda solar y panel fotovoltaico

Fuente: (Ida, 2019)

Los módulos fotovoltaicos poseen dos principales características eléctricas, tensión de circuito abierto y corriente de corto circuito, que se necesitan para seleccionar el módulo apropiado para cada tipo de aplicación. La tensión de circuito abierto V_{OC} es medida cuándo el modulo está sin ninguna conexión en sus terminales. Al conectar los terminales directamente, en el amperímetro se mide la corriente de cortocircuito, I_{SC} .

En este proyecto se utilizó los módulos fotovoltaicos JKM300M-72 del fabricante Jinko Solar, los cuales se encuentran disponibles en el simulador de tiempo real Typhoon HIL, de acuerdo con la hoja de datos del equipo, se tiene los valores requeridos para el buen funcionamiento, con las curvas características del módulo, valores de temperatura e irradiación, 25° y 1000 W/m^2 , respectivamente, como se muestra en la Figura 6.

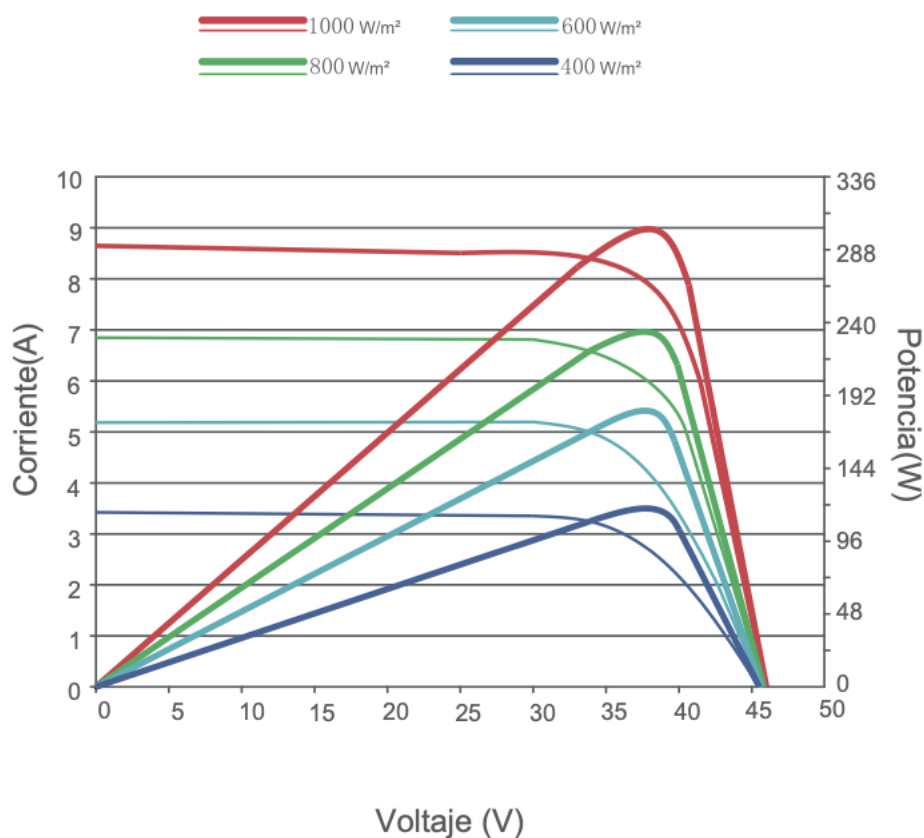


Figura 6. Curvas de Intensidad vs Tensión y Potencia vs Tensión del módulo fotovoltaico JKM300M-72
Fuente: (JKM300M-72)

En la Figura 6, se puede observar que al variar la irradiación en el módulo fotovoltaico, el valor de corriente de cortocircuito I_{SC} , disminuye al igual que su potencia.

2.3 Extractor de máximo punto de potencia del panel solar

La variación de temperatura y de irradiación, ocasionan que varíe, a cada instante, la potencia eléctrica, de los módulos fotovoltaicos. Así, la variación que presentan los módulos fotovoltaicos en la potencia eléctrica, hace que sea oportuno el uso de seguidores de punto de máxima potencia (MPPT) para elevar la eficiencia del sistema fotovoltaico.

El MPPT extrae la máxima energía del sistema a pesar de los cambios de radiación solar y temperatura de operación del módulo fotovoltaico. En la literatura, se tienen distintos tipos de técnicas para el MPPT.

Las dos principales técnicas de control comerciales son:

- Perturba y Observa (P&O)
- Conductancia Incremental

En este trabajo se va a utilizar la técnica de control P&O, ya que presenta resultados similares a la técnica conductancia incremental, basados en (Pereira, 2016) y es una de las dos principales técnicas comerciales de MPPT en el mercado.

- **Perturba y Observa**

Es una de las técnicas más utilizada debido a su fácil implementación, necesita pocos parámetros como la tensión y corriente de los paneles fotovoltaicos para realizar el MPPT. Consiste en perturbar periódicamente la tensión del panel en un determinado sentido (con incrementos o decrementos de la constante ΔV), depende de las variaciones de potencia y tensión resultantes, como se puede observar en la Figura 7.

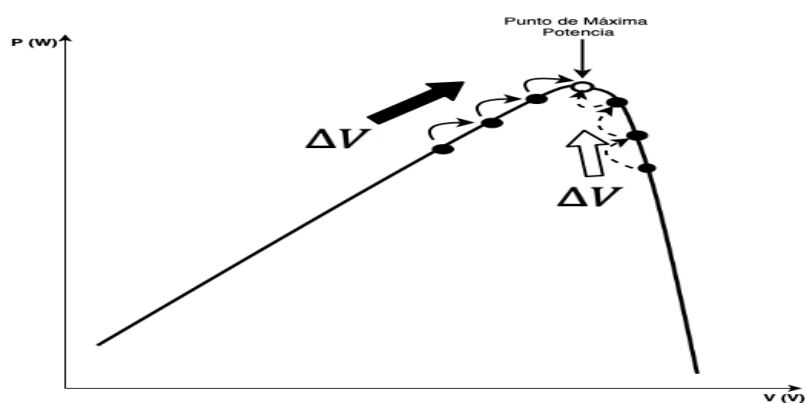


Figura 7. Curva demostrativa del comportamiento de potencia generada de un panel solar aplicado el algoritmo P&O.

El diagrama de flujo de la técnica P&O, se muestra en la Figura 8

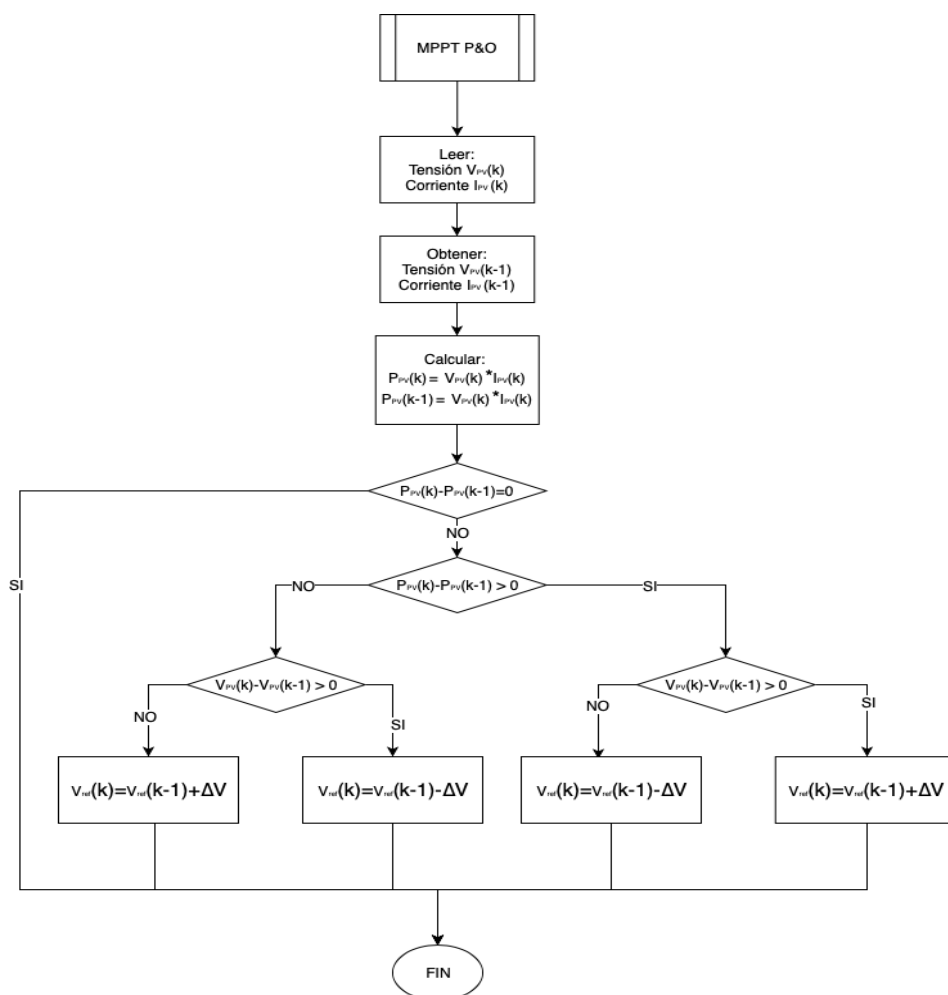


Figura 8. Diagrama de flujo de la técnica P&O

2.4 Convertidor elevador DC/DC (Boost)

Los convertidores DC/DC permiten controlar el flujo de energía eléctrica continua entre dos niveles de tensión. El convertidor elevador (Boost) es utilizado para aumentar la tensión que es generada por el panel fotovoltaico, donde la tensión de salida es mayor a la entrada.

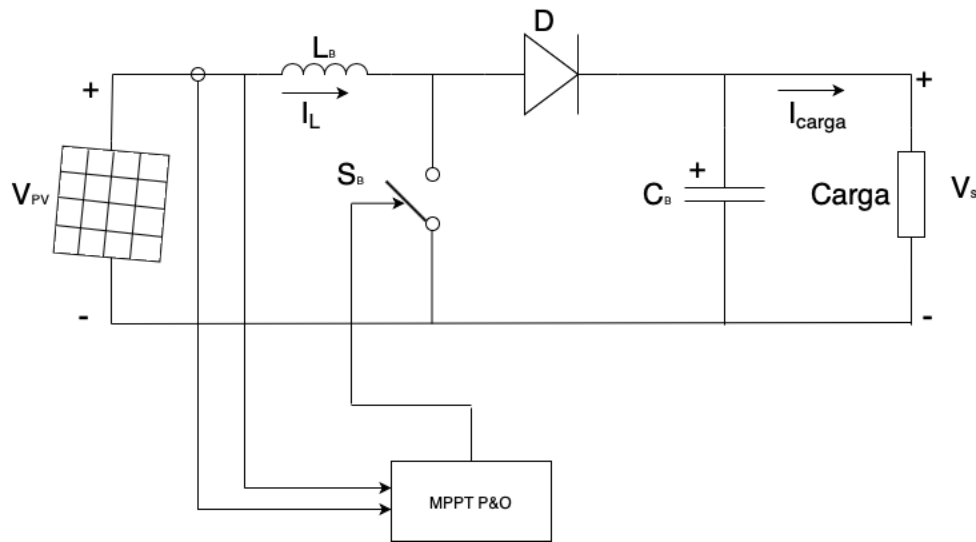


Figura 9. Circuito del conversor Boost

En la Figura 9 se muestra el esquema del conversor Boost, cuando el interruptor S_B esta cerrado, la corriente fluye a través del inductor L_B , cargándose. Cuando el interruptor esta abierto, el inductor se descarga y su polaridad cambia de modo que se agrega a la tensión de entrada. Por lo tanto, la tensión en el inductor y del panel fotovoltaico está en serie, juntos cargan el condensador de salida a una tensión más alta que la entrada.

El conversor Boost puede ser diseñado mediante las siguientes ecuaciones (Silva, 2015) (Ida, 2019):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.2)$$

$$L_B = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_B} \cdot f_s} \quad (2.3)$$

$$C_B = \frac{I_{max} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{out}} \quad (2.4)$$

$$\Delta I_{L_B} = 5\% \cdot \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (2.5)$$

Dónde:

D : es el ciclo de trabajo del convertidor, adimensional;

L_B : Inductor [H];

C_B : Capacitor [F];

f_s : frecuencia de conmutación [Hz];

ΔI_{L_B} : Ondulación de corriente del inductor [A];

V_{in} es igual a V_{PV} : Tensión de entrada del convertidor [V];

V_{out} es igual a V_S : Tensión de salida del convertidor [V];

I_{max} : Corriente máxima [A];

ΔV_{out} : Ondulación de tensión del capacitor [V].

2.5 Inversor monofásico

Los convertidores DC-AC (también llamados inversores) son empleados para controlar el flujo de energía eléctrica entre una fuente continua en el origen a una fuente alterna en el destino, la cual puede ser monofásica o trifásica. Los inversores de tensión monofásicos empleados en este trabajo, han sido objeto de investigación a lo largo de los años.

Depende de la aplicación, el inversor puede ser alimentado en tensión (VSI) o en corriente (CSI). Los inversores VSI deben proporcionar en su salida una tensión senoidal. Sin embargo, la operación de interruptores de alta frecuencia, la cual permite realizar la conmutación para la conversión a corriente alterna, generan armónicos indeseables en la salida del inversor. Para este propósito, se utiliza un filtro pasa-bajas, que permite filtrar el contenido armónico y tener

la frecuencia fundamental en la salida del inversor, generalmente usa una configuración tipo L-C en la aplicación de sistemas de generación fotovoltaica.

2.5.1 Inversor monofásico puente de onda completa

Cuando se trata de inversores monofásicos de tensión, varias estructuras son presentadas en la literatura. La elección de la estructura más adecuada depende de diversos aspectos como la aplicación, costo, potencia.

Este trabajo se centra en inversores con la estructura de puente de onda completa por ser la más utilizada y adecuada para aplicaciones en sistemas de generación fotovoltaica (R. Ortega, 2015) (Joshi & Vaidya, 2014). En la Figura 10, se puede observar la topología del inversor puente de onda completa.

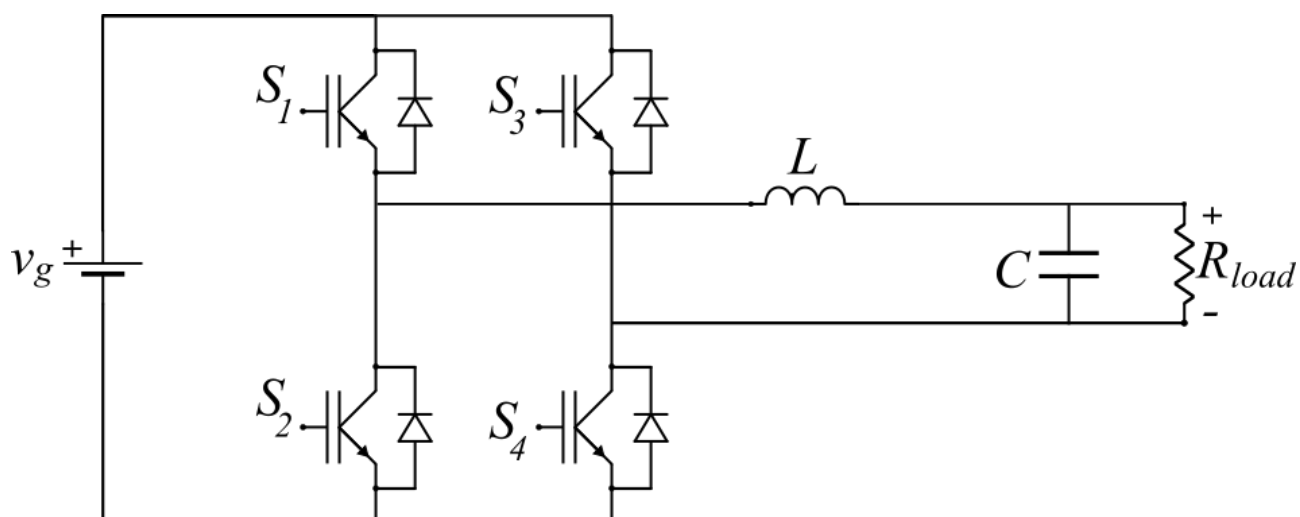


Figura 10. Topología Inversor puente onda completa

Donde V_g es la tensión continua que alimenta al inversor. L y C es el filtro pasa-bajas y R_{load} es la resistencia de carga.

2.5.2 Modelo matemático del inversor monofásico puente completa

Para diseñar adecuadamente el control del inversor, se debe obtener un modelo matemático que represente el comportamiento del inversor puente de onda completa en relación con el voltaje de salida (Cutler & Ramaker, 1980). La variable de control del inversor es la relación cíclica de los interruptores y la variable a controlar es la tensión de salida. Por lo tanto, se busca definir una función que involucre la tensión de salida en relación con la señal de control, se debe considerar que la señal moduladora y la función de modulación. La ecuación del modelo matemático del inversor puente de onda completa depende de la modulación impuesta a sus interruptores.

El generador fotovoltaico se comporta como una fuente de corriente, por lo cual, la alimentación del inversor debe ser del tipo LSI, sin embargo, el convertidor DC/DC elevador, que se caracteriza como una fuente de tensión permite que la alimentación del inversor sea del tipo VSI.

El inversor monofásico puente de onda completa, está constituido por un conjunto de cuatro interruptores semiconductores controlados, donde S1, S2, S3 y S4. Donde S1, S4 tienen la misma señal de control y S2, S3 tienen una señal de control complementaria a la anterior, por lo que se tiene una única señal de control.

2.5.3 Modulación

El principio de funcionamiento de los inversores están relacionados a una estrategia de modulación, varias son las propuestas en la literatura (Joshi & Vaidya, 2014) (R. Ortega, 2015). Este trabajo se centra en la modulación SPWM (Modulación senoidal por ancho de pulso).

- **Modulación SPWM**

La modulación SPWM se basa en la variación del ancho de pulso, mediante una comparación entre la señal moduladora (senoidal) V_M con una frecuencia fundamental y una señal triangular V_T con una frecuencia mucho mayor que la frecuencia fundamental, como se muestra en la Figura 11.

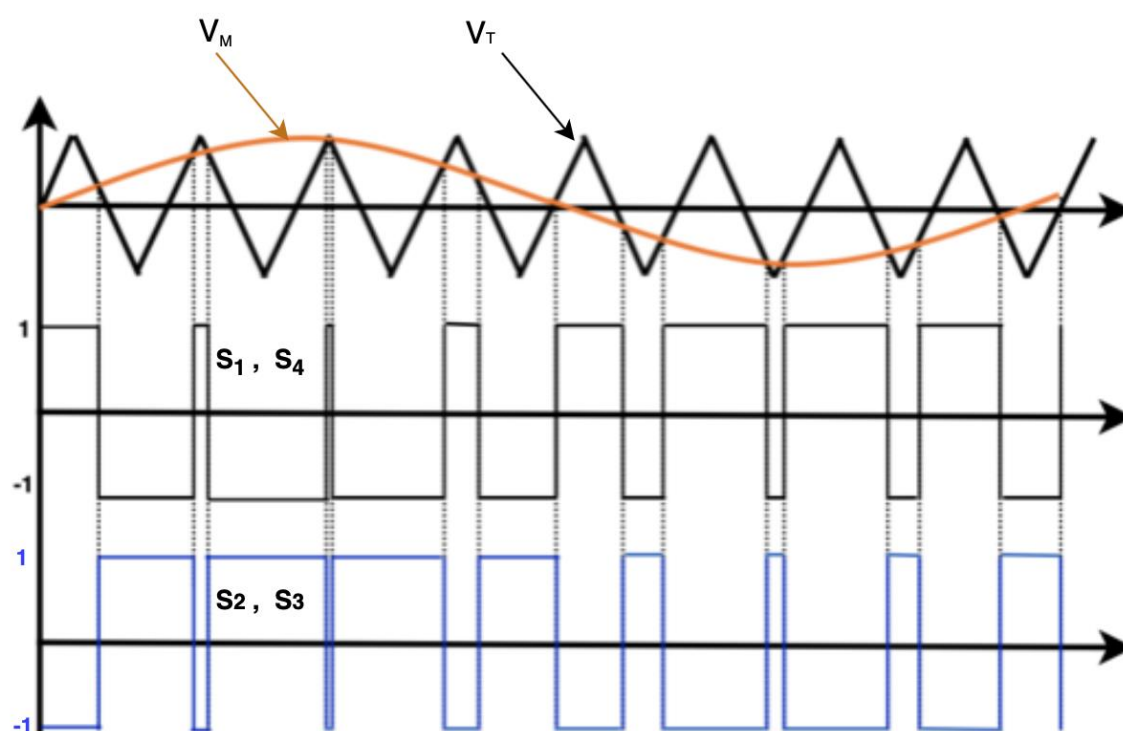


Figura 11. Modulación SPWM

2.6 Control del inversor monofásico

2.6.1 Tipos de control de convertidores de potencia

En los últimos años, debido al aumento en la capacidad de mayor procesamiento de los microprocesadores y microcontroladores, permite la implementación de técnicas de control avanzado; como es el caso de los controladores predictivos (Rodríguez & Cortes, 2012).

Algunos tipos de control de convertidores de potencia en la literatura se puede ver en la Figura 12:

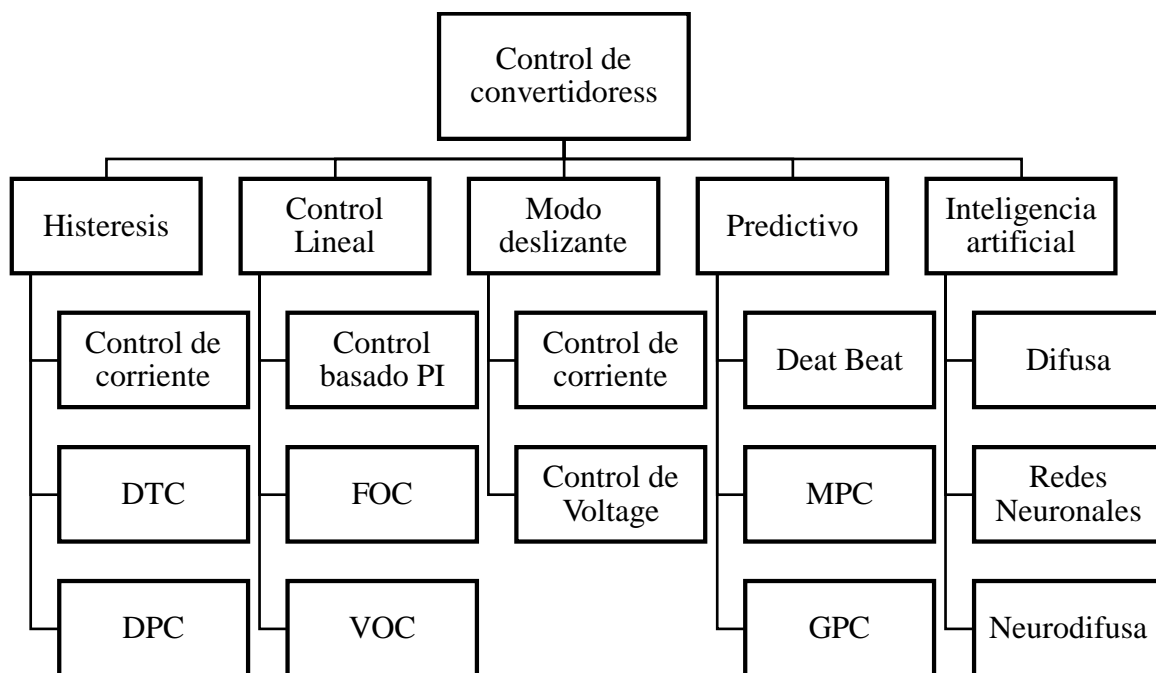


Figura 12. Tipos de controladores para convertidores de potencia
Fuente: (Rodriguez & Cortes, 2012)

Este trabajo se centra en el diseño de un controlador de la familia MPC, el control por matriz dinámica para inversores monofásicos.

2.6.2 Control por matriz dinámica (DMC)

El Control por Matriz dinámica (DMC) tiene una amplia trayectoria en la industria, fue desarrollado a finales de los años setenta por Cutler y Ramaker de Shell Oil Co (Cutler & Ramaker, 1980). El gran éxito de DMC en la industria proviene de su capacidad para trabajar

con procesos multivariados. En este trabajo, se empleará el caso de entrada única y salida única (SISO).

La estrategia DMC en general se describe como en la Figura 13:

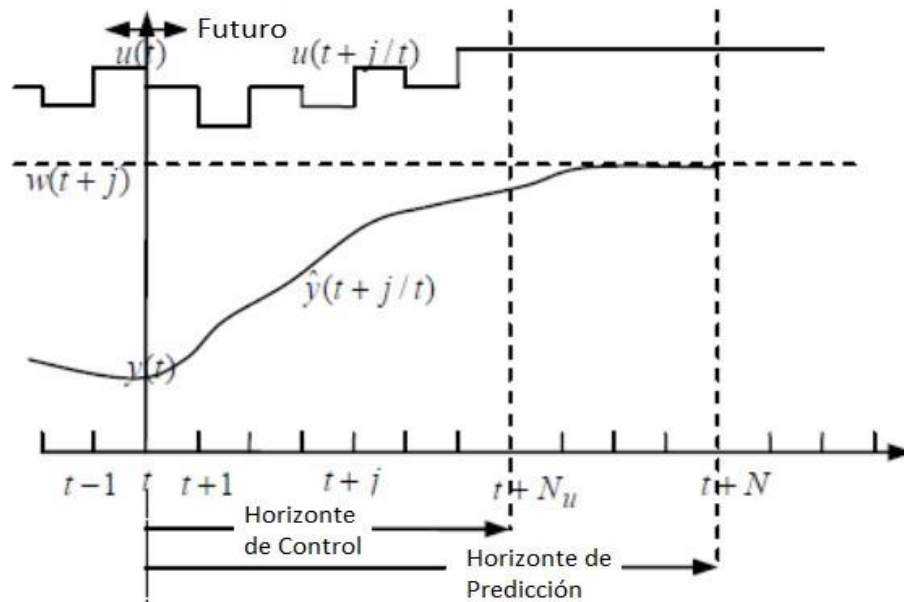


Figura 13. Estrategia DMC

Fuente: (Bordons, 2007)

- Las salidas predichas $\hat{y}(t+j|t)$ para un horizonte de predicción N , se predicen en cada instante t , que utiliza el modelo de proceso de la respuesta escalón.
- Las señales de control futuras $u(t+j|t)$ se calculan mediante la optimización de un criterio como es la función de costo, determinada para que el proceso este lo más cerca posible de la referencia $w(t+j)$.

2.6.3 Modelo matemático del Control por Matriz Dinámica (DMC)

El Control por Matriz Dinámica esta basado en la respuesta de un modelo matemático ante una entrada escalón. La representación de la respuesta, puede expresarse mediante la ecuación.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t - i) \quad (2.6)$$

Donde g_i son los valores muestreados de la salida de la planta ante la entrada escalón, como se muestra en la Figura 14 y $\Delta u = u(t) - u(t - 1)$ son las variaciones de la señal de control.

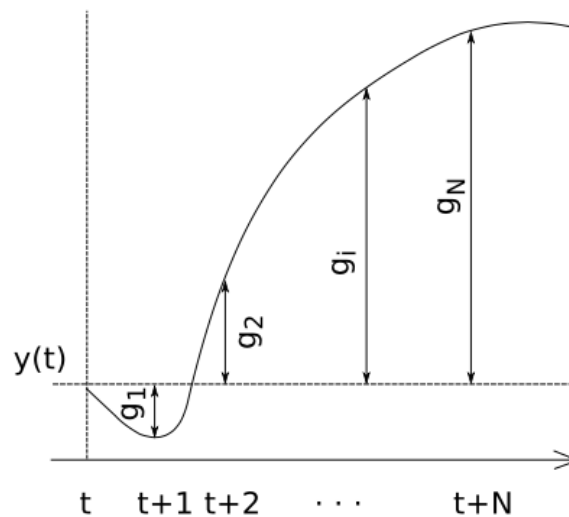


Figura 14. Respuesta de una planta, ante una entrada escalón
Fuente: (Bordons, 2007)

Para poder calcular las predicciones de la salida, es necesario moverse hacia el futuro, es decir moverse k pasos para el frente de la ecuación del sistema (2.6).

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t + k - i) + \hat{n}(t) \quad (2.7)$$

Donde \hat{n} representa las perturbaciones futuras. También se puede escribir como:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t) \quad (2.8)$$

Donde, la primera sumatoria representa los valores futuros y la segunda sumatoria son los valores pasados de la salida. Y si se considera que las perturbaciones en el futuro son constantes, es decir $\hat{n}(t+k|t) = n(t|t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t)$, entonces:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (2.9)$$

El término $\hat{y}(t|t)$ es igual a la ecuación (2.6), se reemplaza en la ecuación anterior y aplicando propiedades de agrupación de sumatorias en el segundo y tercer término que son los valores pasados, se obtiene:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) + \sum_{j=1}^{\infty} (g_{j+k} - g_j) \Delta u(t-j) \quad (2.10)$$

Si el proceso es estable, los coeficientes g_j de la respuesta escalón tienden a un valor constante después de N períodos de muestreo, por lo que se puede considerar que

$$g_{j+k} - g_j \approx 0 \quad (2.11)$$

y, por lo tanto,

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+k} - g_j) \Delta u(t-j) \quad (2.12)$$

La primera sumatoria representa la respuesta forzada y el resto es la respuesta libre que se puede calcular como:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+k} - g_j) \Delta u(t-j) \quad (2.13)$$

Donde la respuesta libre es el comportamiento del sistema suponiendo que los cambios de control son cero. Reemplazando (2.13) en (2.12), se tiene:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + f(t+k) \quad (2.14)$$

Asignando valores a $k=1,2,3,4, \dots$ en (2.14) se tiene:

$$\hat{y}(t+1|t) = g_1 \Delta u(t) + y_m(t) + \sum_{j=1}^M (g_{j+1} - g_j) \Delta u(t-j) \quad (2.15)$$

$$\hat{y}(t+2|t) = g_1 \Delta u(t+1) + g_2 \Delta u(t) + f(t+2) \quad (2.16)$$

⋮

$$\hat{y}(t+p|t) = \sum_{i=p-m+1}^p g_i \Delta u(t+p-i) + f(t+p) \quad (2.17)$$

Los coeficientes g_i se pueden representar como una matriz dinámica G :

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \dots & g_1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

De las ecuaciones (2.15), (2.16), (2.17) y (2.18), la salida de predicción se puede representar matricialmente, como:

$$\hat{y} = Gu + f \quad (2.19)$$

- Función de costo

En un sistema de control es importante llegar a un compromiso entre el seguimiento de referencia y el esfuerzo de control. En convertidores de potencia, el esfuerzo de control está relacionado con las variaciones de voltaje o corriente, la frecuencia de conmutación o las pérdidas de conmutación (Bordons, 2007). Mediante control predictivo, es posible considerar cualquier medida de esfuerzo de control en la función de costo, para reducirlo.

El objetivo del DMC es que la salida este lo más cerca posible de la referencia, esto se busca al minimizar la función de costo.

$$J = \sum_{j=1}^P [\hat{y}(t+j|t) - W(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^N \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2.20)$$

Donde:

- J es la función de costo
- $W(t+j)$ son las referencias futuras
- $\lambda(j)$ esfuerzo de control

Aplicando cálculos matemáticos en (2.20), se obtiene:

$$J = (G \cdot \Delta u + f - W)^T (G \cdot \Delta u + f - W) + \lambda \cdot \Delta u^T \cdot \Delta u \quad (2.21)$$

Derivando la ecuación (2.21), e igualando a cero para minimizar la función de costo se tiene:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 2(G^T \cdot G + \lambda \cdot I) \Delta u + 2(f - W)^T G = 0 \quad (2.22)$$

- **Ley de control**

Para calcular la ley de control, se debe despejar Δu de la ecuación (2.22)

$$\Delta u = (G^T \cdot G + \lambda \cdot I)^{-1} G^T (W - f) \quad (2.23)$$

Donde $K = (G^T \cdot G + \lambda \cdot I)^{-1} G^T$ y se calcula una sola vez. La ley de control está definida de la siguiente manera:

$$\Delta u = K(W - f) \quad (2.24)$$

Donde $\Delta u = u(t) - u(t - 1)$, se reemplaza y despeja de la ecuación anterior.

$$u = K(W - f) + u_{ant} \quad (2.25)$$

Donde u es la ley de control, que es implementado para el controlador DMC.

2.7 Hardware in the Loop (HIL)

Es una técnica donde las señales reales de un controlador conectadas a un sistema de pruebas que simula el ambiente real de acción, permite el desarrollo y comprobación de sistemas embebidos en tiempo real. La misma puede ejecutar de forma fácil en infinidad de escenarios ajustables para la verificación del controlador reduciendo tiempos y costos inherentes a las pruebas físicas tradicionales.

Los elementos constituyentes de un equipo HIL son: ordenador con sistema operativo en tiempo real, interfaz de entrada/salida con el operador, interfaz de entrada/salida para el ordenador y servidor (Muñoz, 2016).

La técnica HIL también se considera como una simulación física-virtual, con gran presencia en aplicaciones de la industria aeroespacial, automotriz, marina y militar.

Dentro del espectro de usos, existen aplicaciones en la implementación de simulaciones para conversión de potencia, donde la topología basada en Boost constituye el hardware y el

simulador de potencia HIL es utilizado para analizar la operación de la generación distribuida (DG) conectada a la red. Con lo mencionado se destacan algunas ventajas de la técnica HIL (Quirino, y otros, 2016):

- Ejecución de una simulación previa y a la par con el desarrollo de la planta, con la posibilidad de sustituir las partes en caso de ser necesarias.
- Poner a prueba a la planta basada en HIL, a ambientes extremos sin dañar la planta real.
- Reducción del coste de desarrollo, se eliminan prototipos parciales de elementos del sistema y procesos de verificación, posibilidades de un sistema real.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL MPPT Y CONVERTIDOR BOOST

En este capítulo se presenta el diseño del extractor de máximo punto de potencia del panel solar y del convertidor elevador DC/DC. Se puede visualizar el diagrama a ser implementado en la Figura 15.

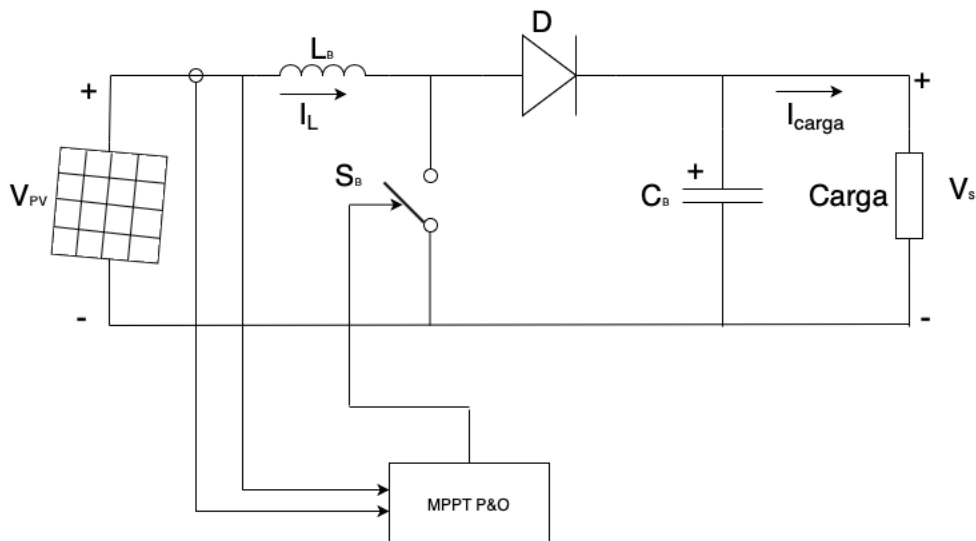


Figura 15. MPPT y conversor Boost propuestos.

3.1 Implementación del algoritmo de MPPT

El algoritmo MPPT fue implementado en el programa Typhoon HIL, como se observa en la Figura 16, también utilizado para la implementación del inversor monofásico:

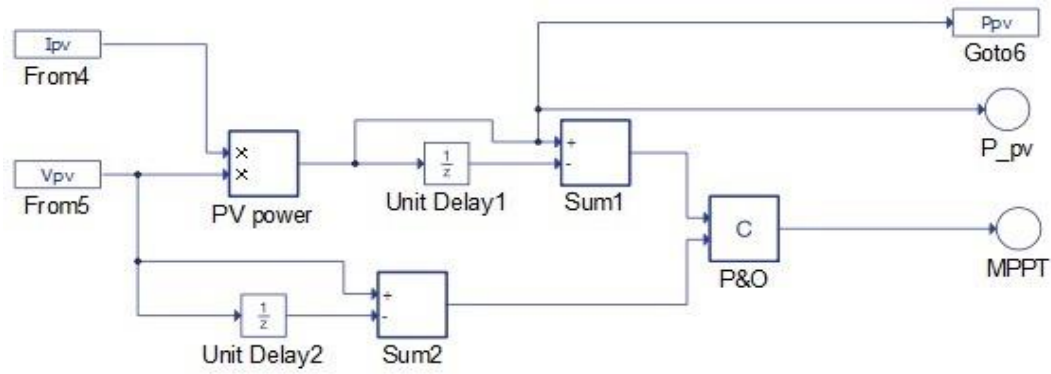


Figura 16. Implementación del algoritmo P&O

En el bloque P&O esta implementado la función del algoritmo Perturba y Observa en lenguaje en C, la cual fue realizado mediante el diagrama de flujo de la Figura 16.

3.2 Dimensionamiento del convertor Boost

En la Tabla 5 se muestra los parámetros definidos para el convertor Boost del proyecto

Tabla 5.
Parámetros del convertor Boost

Descripción	Parámetro	Valor
Tensión de entrada DC	V_{PV}	36 V
Tensión de salida DC	V_S	200 V
Potencia de entrada máxima	P_{MAX}	1000 W
Frecuencia de conmutación	f_s	10kHz

1. Ciclo de trabajo

Por la ecuación (2.2) y (2.5), se calcula:

$$D = \frac{200[V] - 36[V]}{200[V]} = 0.82$$

$$\Delta I_{L_B} = 0.05 \cdot \frac{1000[W]}{36 [V]} = 1.39 [A]$$

2. Para el cálculo del valor del inductor, se reemplaza en la ecuación (2.3)

$$L_B = \frac{36 [V] \cdot 0.82}{1.39 [A] \cdot 10\,000 [Hz]} = 2.12 [mH]$$

3. Para el cálculo del valor del capacitor, se asume un valor de ondulación en el capacitor de $\Delta V_{out} = 1.5\% V_{out} [V]$ y se reemplaza en la ecuación (2.4)

$$C_B = \frac{27.78 [A] \cdot 0.82}{3 [V] \cdot 10\,000 [Hz]} = 759.32 [\mu F]$$

El valor comercial más próximo del capacitor es de $C = 820[\mu F]$

En la Figura 17, se puede observar el MPPT y el convertor Boost, implementados. Con los parámetros de diseño en el programa Typhoon HIL.

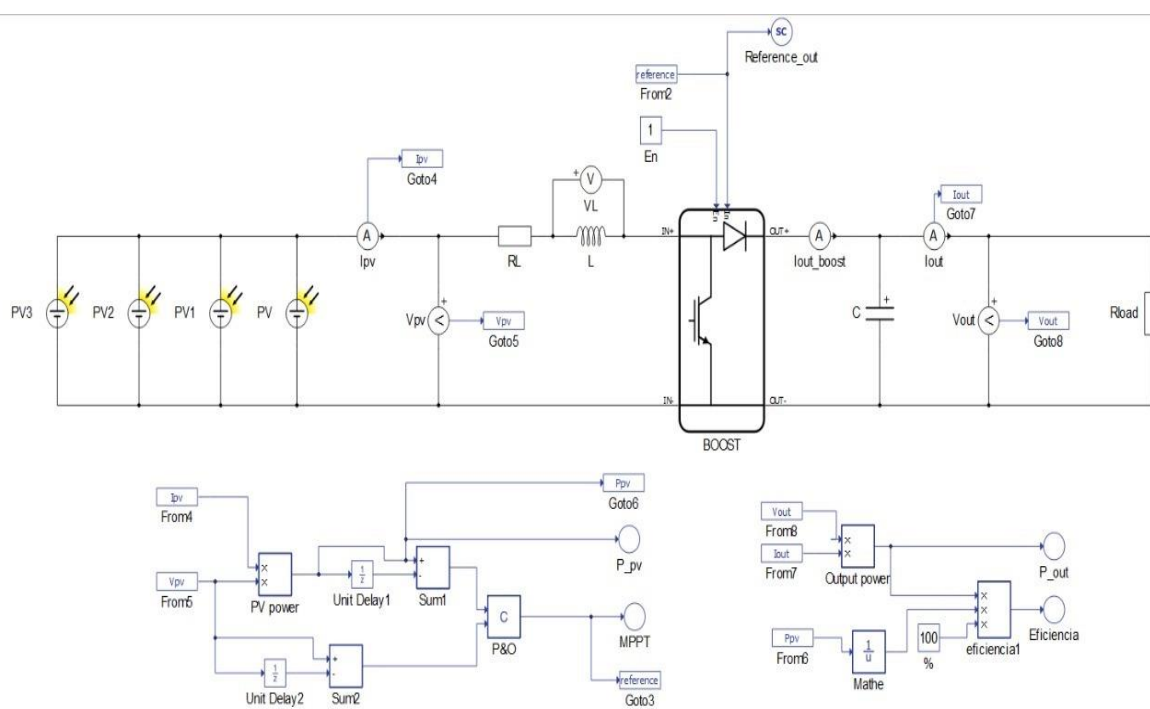


Figura 17. Implementación del MPPT y convertidor Boost

En la Figura 18, se puede observar las curvas características de Tensión vs Corriente y Tensión vs Potencia, dónde se verifica el funcionamiento del MPPT, el cuál se representa por el círculo verde, que indica el punto de máxima potencia. También se puede verificar que los paneles fotovoltaicos trabajan con una eficiencia del 99.99%.

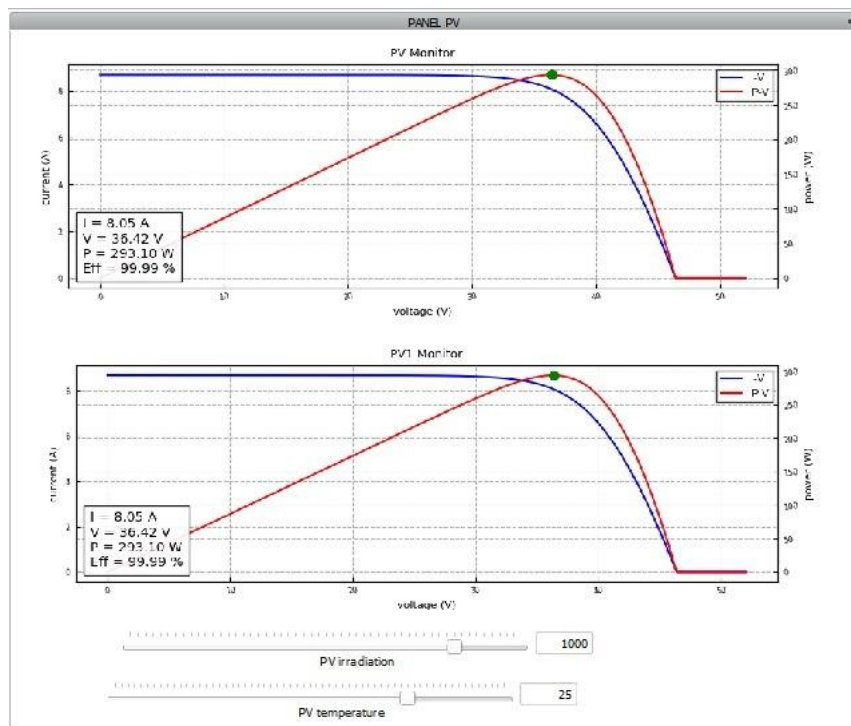


Figura 18. Curvas características del módulo fotovoltaico empleado el MPPT

En la Figura 19, se observa la amplificación de tensión generada por el convertidor Boost con una entrada de 36.21 V a una salida de 203.84V, según lo requerido. Además en la Figura 20, los valores respectivos de las potencias y su eficiencia.

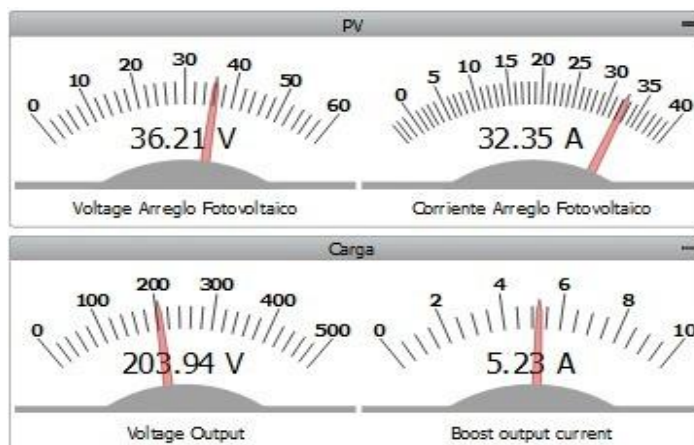


Figura 19. Valores de entrada y salida del convertidor Boost

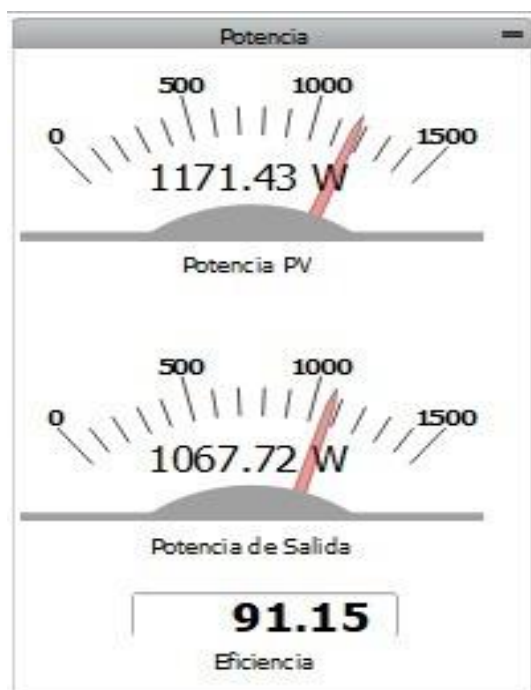


Figura 20. Valores de Potencia de entrada y salida del convertidor Boost

CAPÍTULO IV

DISEÑO Y CONTROL DEL INVERSOR

En este capítulo se presenta el diseño del inversor monofásico puente onda completa y del control DMC como se muestra en la Figura 21. Se puede visualizar el diagrama a ser implementado, también se tiene un filtro LC para proporcionar la tensión de salida deseada a la frecuencia fundamental (60 Hz). Luego hay una retroalimentación de la tensión de salida, que alimenta el controlador DMC y se compara con una señal de referencia sinusoidal, que tiene características idénticas de la red eléctrica.

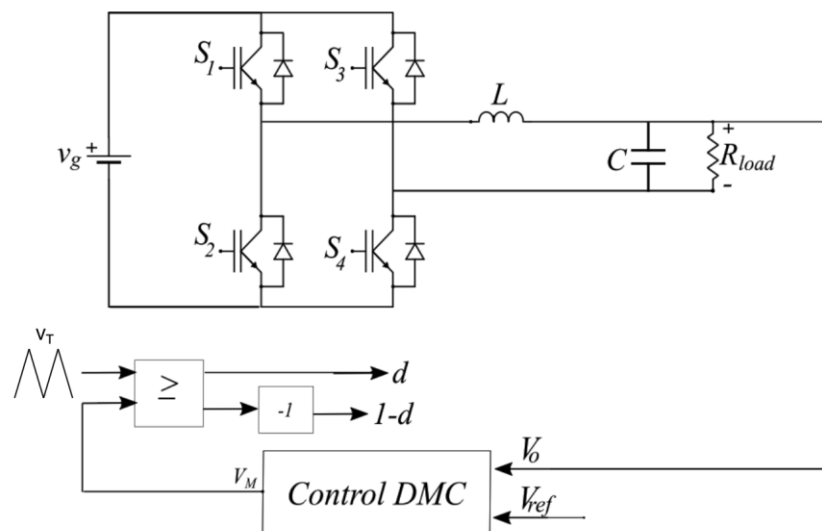


Figura 21. Inversor monofásico y control DMC propuestos. 3

Requisitos de control:

- Seguimiento a una señal sinusoidal de referencia, sin error en el régimen permanente;
- Rechazar perturbaciones;

- Tensión de control como variable de salida.
- Ciclo de trabajo d como variable de control. Donde S1, S4 tienen la misma variable de control d y S2, S3 tienen una señal de control complementaria a la anterior $(1-d)$.

4.1 Especificaciones del inversor monofásico puente onda completa

Se busca que la tensión de salida del inversor monofásico sea sinusoidal y tenga una frecuencia similar a la red eléctrica de $f = 60 \text{ Hz}$, así también su valor de tensión sea $V_{RMS} = 110 \text{ V}$. En la Tabla 6 se puede observar los parámetros del inversor monofásico.

Tabla 6.
Parámetros del inversor monofásico

Descripción	Parámetro	Valor
Tensión de entrada DC	V_g	200V
Tensión de salida AC	V_{RMS}	110V
Potencia máxima	P_{MAX}	1000 W
Frecuencia de salida	f_1	60Hz
Frecuencia de conmutación	f_s	10kHz

4.2 Diseño del filtro de salida del inversor.

Para el diseño del filtro LC como se muestra en la Figura 22, es necesario calcular los valores de la inductancia y del capacitor, con una atenuación de -40dB/década , ya que tiene dos elementos almacenadores de energía.

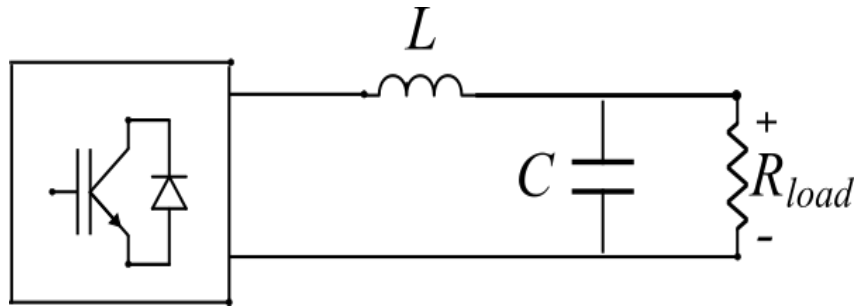


Figura 22. Filtro LC

La función de transferencia del filtro LC, sin carga es:

$$H_1(s) = \frac{1}{L \cdot C s^2 + 1} \quad (2.26)$$

De la ecuación (2.26) la frecuencia de corte del filtro LC se puede obtener como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.27)$$

La frecuencia de corte del filtro LC debe ser mucho menor que la frecuencia de conmutación f_s .

$$f_c \ll f_s \quad (2.28)$$

De la ecuación (2.28) se asume un valor para el inductor de $L = 2 \text{ mH}$, además se propone una frecuencia de corte de 1 kHz. Entonces al despejar y reemplazar los valores en la ecuación (2.27) el valor del capacitor es:

$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_c)^2 \cdot L} = 3.1603 \mu\text{F}$$

El valor comercial más próximo del capacitor es de $C = 3.3 \mu\text{F}$, entonces la nueva frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \text{ mH} \cdot 3.3 \mu\text{F}}} = 1.95 \text{ kHz}$$

Al considerar las especificaciones de la Tabla 6, para la carga se tiene:

$$R = \frac{V_{RMS}^2}{P_{MAX}} = \frac{(110 V)^2}{1000 W} = 12.1 \Omega$$

La función de transferencia del filtro LC al tomar en cuenta la carga es.

$$H_2 = \frac{1}{L \cdot C s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + 1} \quad (2.29)$$

En la Figura 23, se muestra el diagrama de bode de la ecuación (2.29) para diferentes valores de carga, se observa el efecto que ocasiona la carga en la respuesta del filtro.

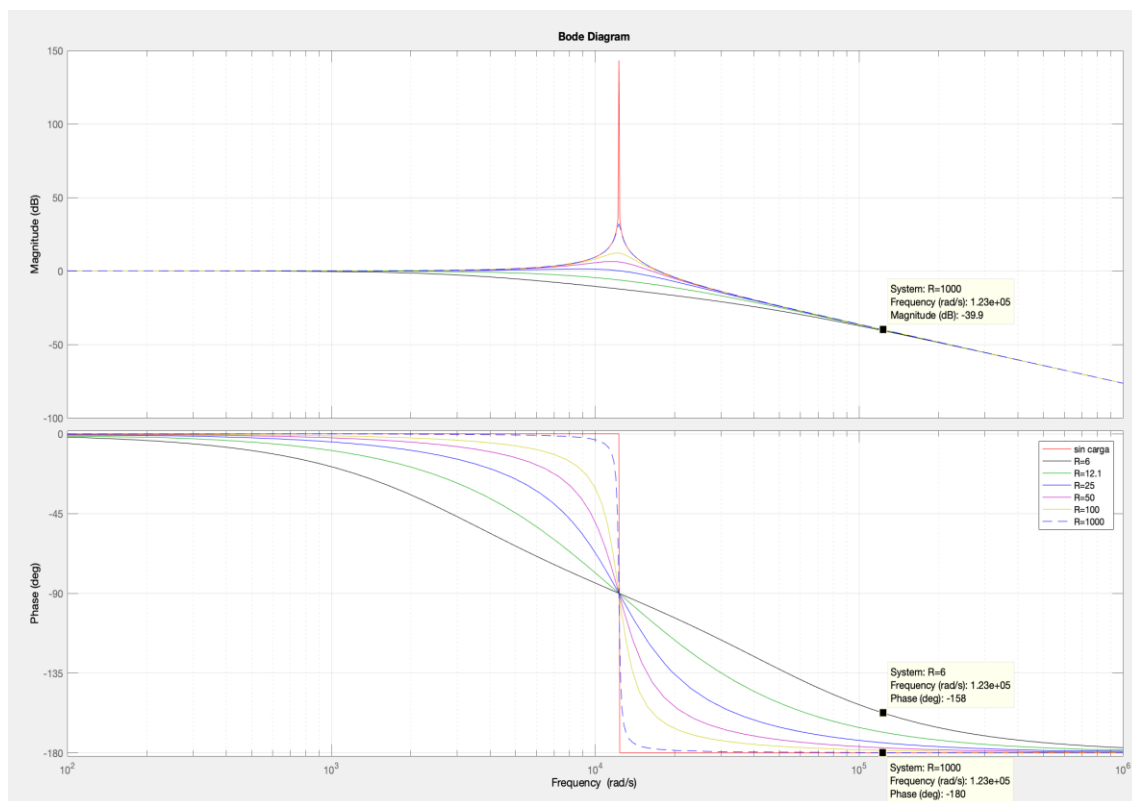


Figura 23. Diagrama de la función de transferencia del filtro LC con carga

Se va a trabajar con la carga de $R = 12.1 \Omega$ y verificar el comportamiento del controlador DMC ante variaciones de carga.

4.3 Diseño del controlador DMC para el inversor

El diseño del controlador DMC, se obtiene en base del modelo de respuesta al escalón, por lo cual es necesario conocer la función de transferencia que representa el comportamiento del inversor, para calcular los parámetros del controlador DMC. Por lo tanto, se debe discretizar la planta, para aplicar la respuesta ante una entrada escalón. El mínimo tiempo de muestreo que permite la placa controladora a usar es igual a $T_s = 0.001s$, tiempo con el que se trabaja para el diseño del control DMC.

4.3.1 Modelo de proceso

La función de transferencia del inversor monofásico de puente onda completa esta dada por la expresión determinada en el trabajo (Suquillo & Alex, 2019), es:

$$G_{inv}(s) = \frac{\hat{v}_g(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{800}{1.1 \cdot 10^{-7} s^2 + 0.0004169 s + 1.001}$$

Para discretizar la planta, se utiliza la función de matlab c2d, con un periodo de muestreo $T_s = 0.001s$.

$$G_{Inv}(z) = \frac{y(k)}{u(k)} = \frac{814.2 z + 171.4}{z^2 + 0.2106 z + 0.0226}$$

Se aplica una entrada escalón a la función de transferencia discretizada, para obtener los valores de g_i empleados en el diseño del controlador, como se muestra en la Tabla 7. Luego se arma la matriz dinámica G de dimensión $N \times N_u$, con los valores calculados anteriormente.

Tabla 7.

Valores de g_i

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
0	402.30	178.93	300.12	235.92	269.06	252.45	260.48	256.78	258.381
g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
256.76	257.95	257.93	257.89	257.94	257.90	252.93	257.91	257.92	251.91

Se considera un horizonte de predicción de $N=20$ y un horizonte de control de $N_u=8$, basado en la Figura 24, la matriz dinámica se obtiene de los coeficientes de la respuesta escalón.

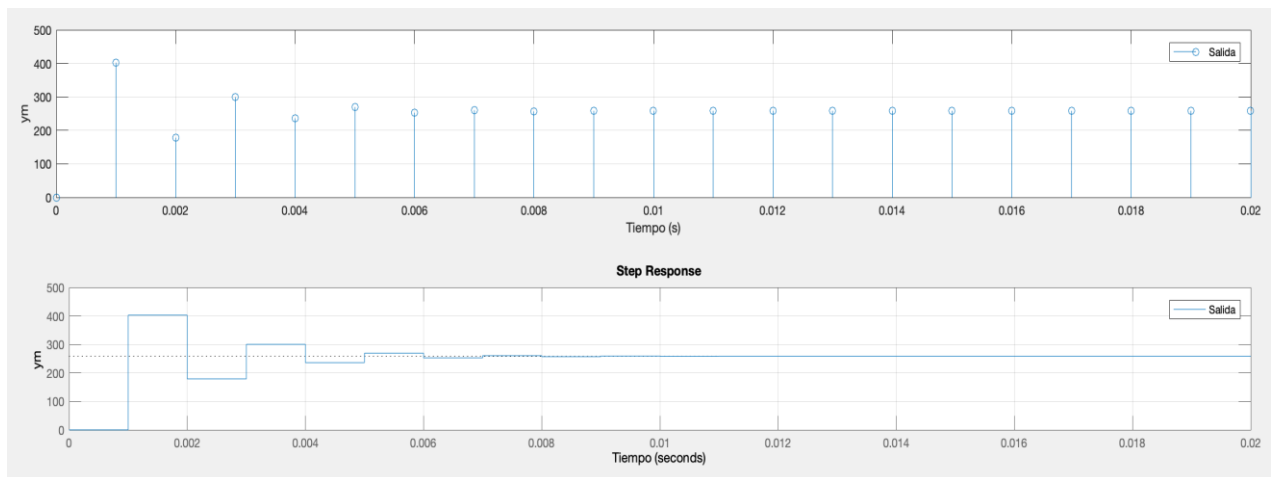


Figura 24. Respuesta ante una entrada escalón a la planta

Otro de los parámetros para el diseño del controlador es K , se calcula una sola vez y es constante.

$$K = (G' \cdot G + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot G'$$

Donde:

λ : Ponderación del controlador.

I: Matriz identidad, mismas dimensiones de G.

4.3.2 Ley de control

De la ecuación (2.25), la ley de control viene dada por el producto de la primera fila de K, multiplicado por el vector que contiene la diferencia entre la trayectoria de referencia y la respuesta libre f.

$$u(t) = K(w - f) + u_{ant}$$

Donde w es el vector de referencias, la ley de control ha sido implementada en un script en Matlab. Se adjunta en los anexos al final del trabajo.

4.3.3 Simulación del controlador DMC

Para la programación de la estrategia de control DMC, se realizó un diagrama como se muestra en la Figura 25.

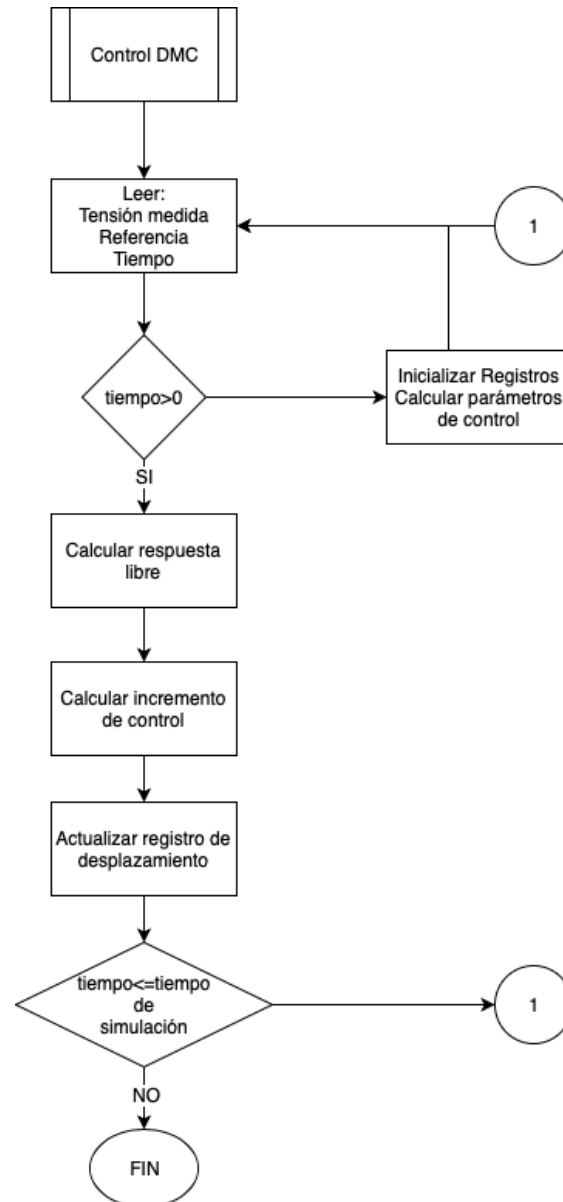
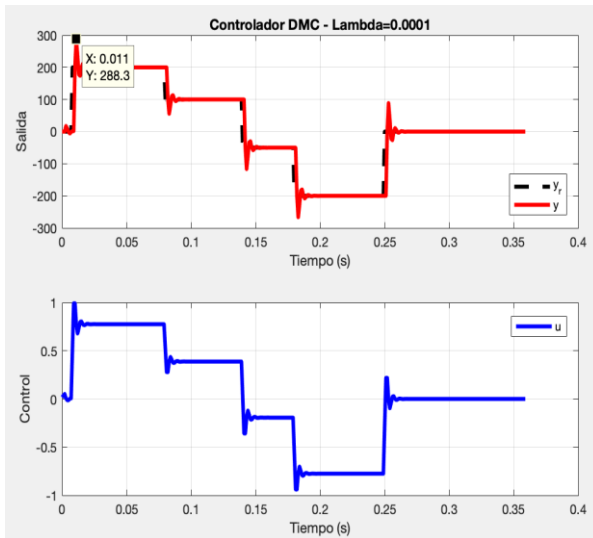
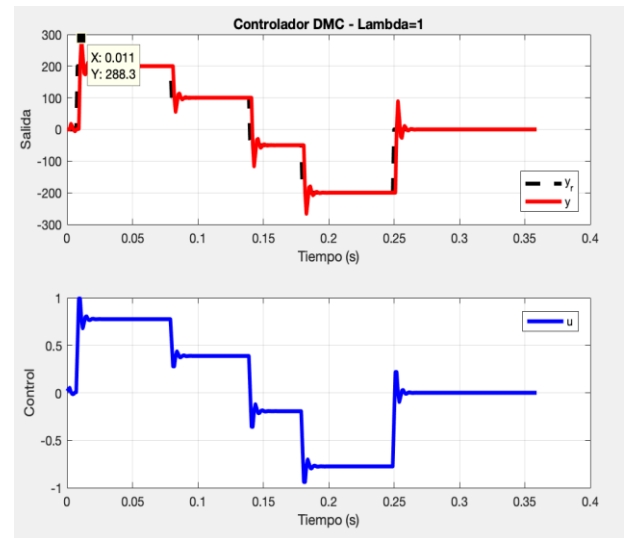


Figura 25. Diagrama de flujo del algoritmo de la ley de control DMC

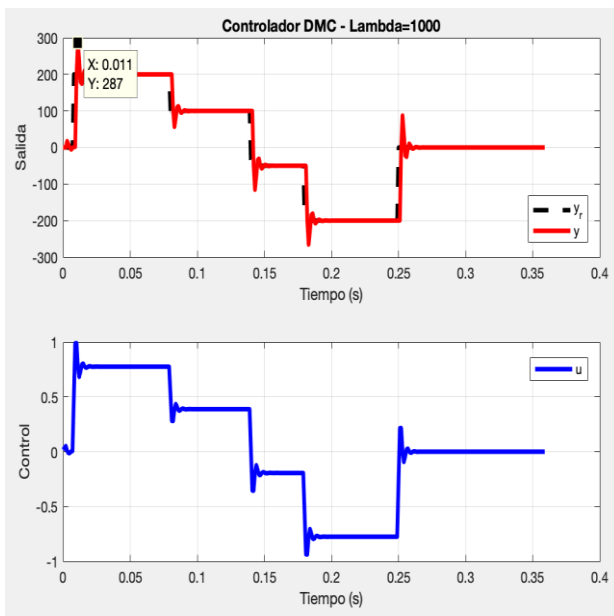
Para establecer un criterio de ponderación de control adecuado, se ha realizado diferentes pruebas al variar a diferentes valores para $\lambda = 0.0001, 1, 1000, 150000$ y 200000 .



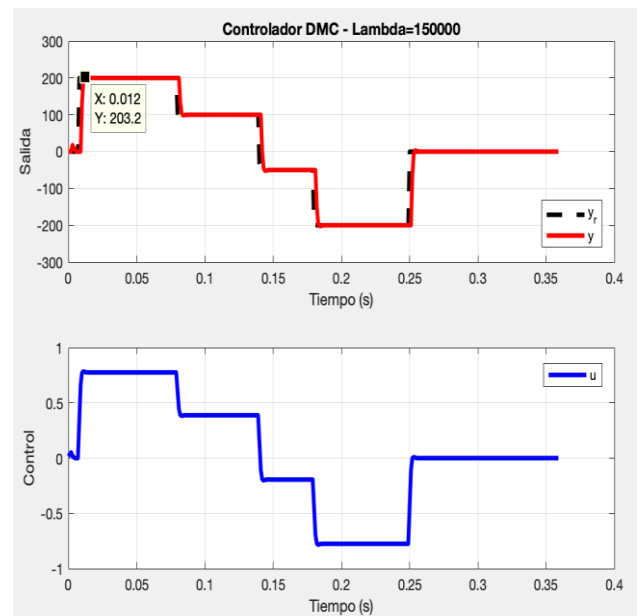
(a) $\lambda = 0.0001$



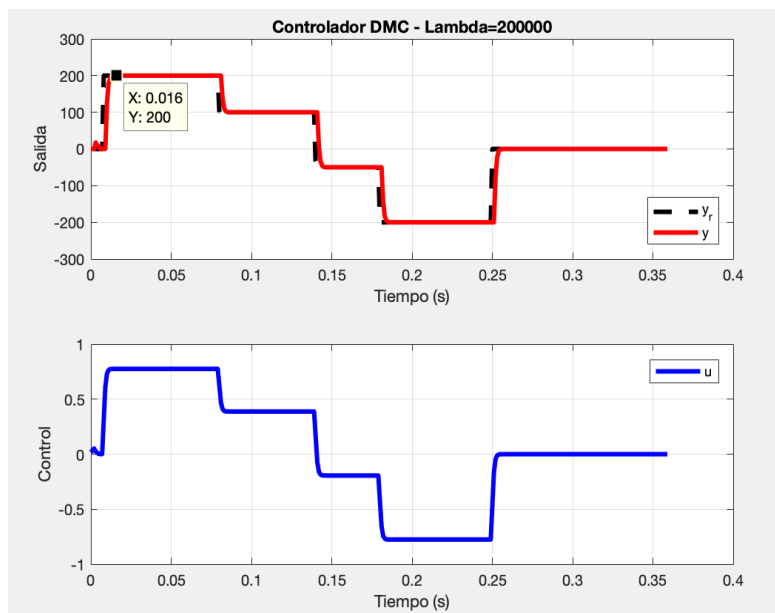
(b) $\lambda = 1$



(c) $\lambda = 1000$



(d) $\lambda = 150000$

(e) $\lambda = 200000$ **Figura 26.** Respuesta para diferentes parámetros de ponderación.

Ante una señal del tipo escalón como referencia, que varía entre 0, 200, 100, -50 y -200. En las Figura 26 se observa las respuestas para el controlador DMC, antes variaciones de λ . Donde el valor más óptimo del parámetro de ponderación es $\lambda = 200000$, cuyo valor será utilizado, para este trabajo. En el caso la figura (e), el seguimiento a la referencia es adecuado con un error de 0V en estado estable.

4.3.3.1. Perturbaciones

Para validar el controlador DMC se debe verificar el rechazo a perturbaciones y que el error de estado estable sea igual a cero.

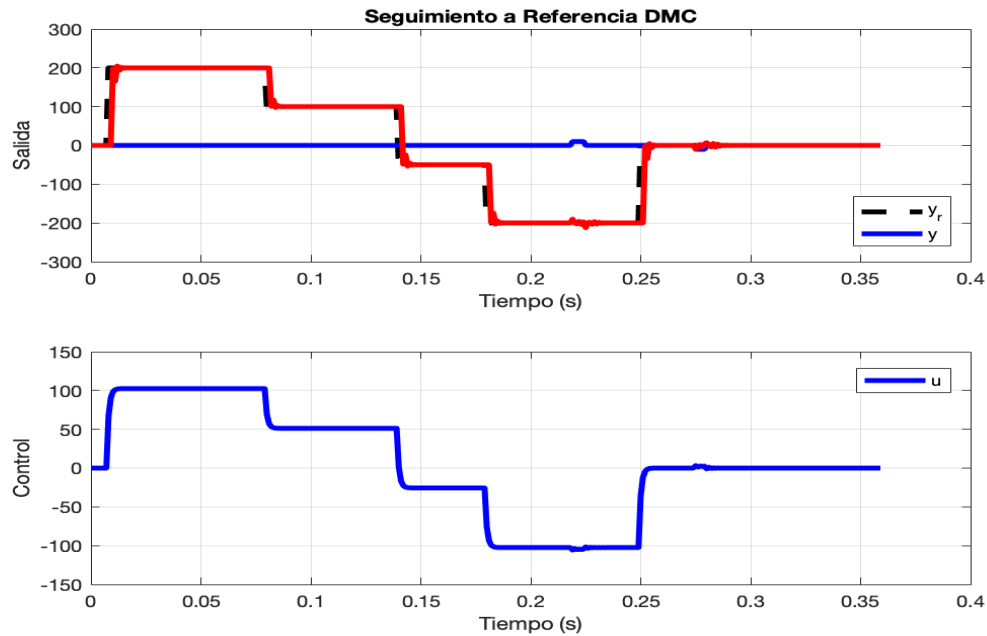


Figura 27. Respuesta ante perturbaciones

En la Figura 27, se verifica que el controlador DMC presenta un desempeño adecuado ante perturbaciones. Se puede observar que cuando la perturbación es positiva, la señal de control reacciona de forma contraria a la perturbación.

4.3.4 Respuesta a referencia sinusoidal

Para este caso la referencia está definida por $V_{ref}(t) = 120 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t)$, donde se realiza pruebas de seguimiento de referencia y el rechazo a perturbaciones.

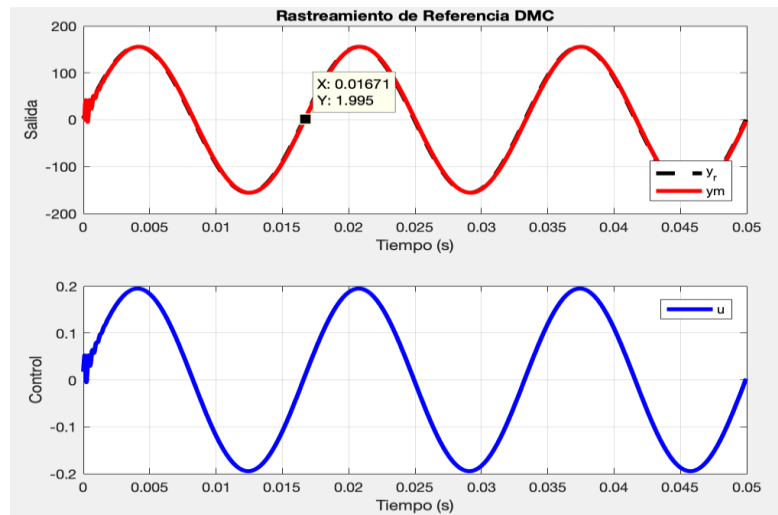


Figura 28. Respuesta ante señal de referencia sinusoidal

En la Figura 28, se observa que el controlador DMC hace un adecuado seguimiento ante una señal de referencia sinusoidal y presenta error de estado estable de 0V.

4.3.4.1 Perturbaciones

Para validar el controlador DMC se debe verificar el rechazo a perturbaciones y que presente error de estado estable igual a cero.

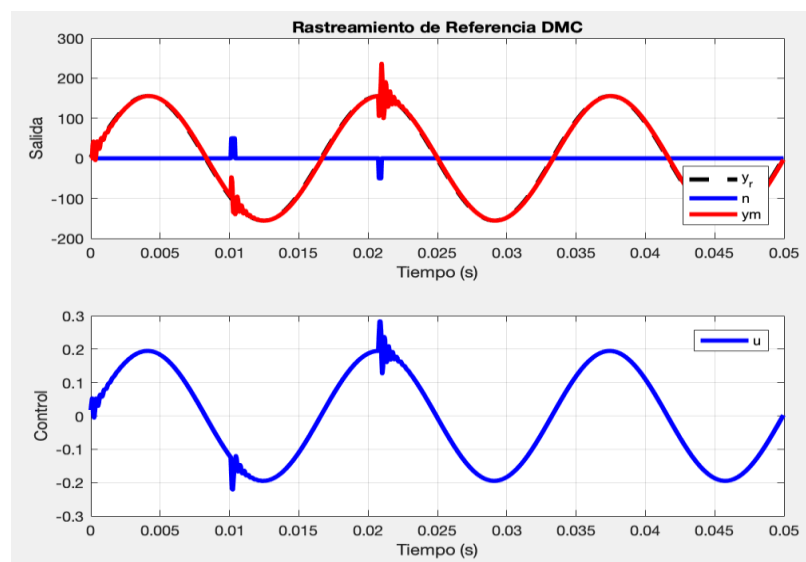


Figura 29. Respuesta ante perturbaciones

En la Figura 29, se puede observar que se agrego dos diferentes perturbaciones una positiva y otra negativa, se verifica que el controlador DMC presenta un desempeño adecuado ante perturbaciones.

4.5 Simulación del inversor monofásico

Para validar el diseño del controlador DMC se ha realizado la simulación del inversor monofásico, como se muestra en la Figura 30, se realiza la retroalimentación de la tensión de salida, que entra al controlador DMC, además se tiene la etapa de modulación SPWM, la cual es encargada de generar las señales de control de los interruptores.

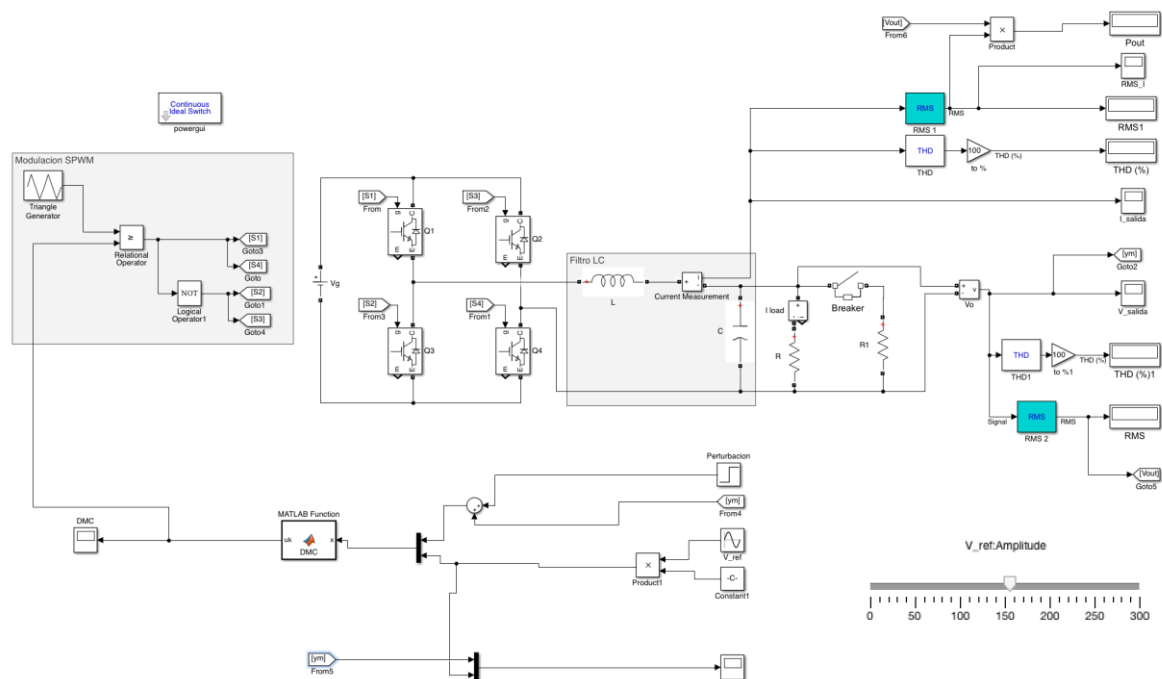


Figura 30. Simulación del inversor monofásico

En la Tabla 8, se puede observar los parámetros de simulación

Tabla 8.
Parámetros de simulación

Parámetros	Descripción	Valor
L	Inductor	2 mH
C	Capacitor	3.3 uF
R	Resistencia	12.1 Ω
f_{tri}	Frecuencia de conmutación	10 KHz
T_s	Periodo de muestreo	0.001
t_{sim}	Tiempo de simulación	infinito

El valor del periodo de muestreo se determinó en base de la resolución del controlador al momento de implementar.

4.6 Resultados de simulación

En la Figura 31, se puede observar que la salida de tensión esta en fase con la señal de referencia y se valida que el controlador DMC, sigue la referencia.

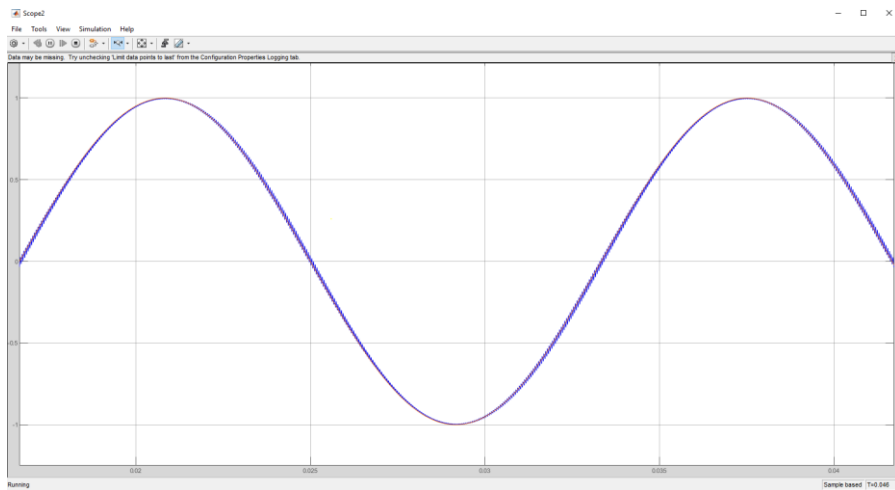


Figura 31. En azul la salida de tensión y en rojo la referencia, simulada.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN DEL INVERSOR MONOFÁSICO Y CONTROL DMC

5.1 Implementación del inversor monofásico puente completa

En la actualidad para la validación de circuitos de electrónica de potencia se utiliza simuladores de tiempo real, el cual permite un ahorro de tiempo y dinero. Para la implementación del inversor monofásico puente completa se utilizó el sistema de hardware en bucle: Typhoon HIL402, dispositivo que cuenta el Laboratorio de Fuentes de Energía Alternativa (LAFAE), perteneciente al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica de la Universidad Federal de Río de Janeiro - UFRJ. El cual permite certificar los controladores de electrónica de potencia.

- **Typhoon HIL402:**

Este compacto hardware, como se muestra en la Figura 32, es extremadamente potente, tiene 4 núcleos, el cual permite probar controladores electrónicos de potencia en una amplia gama de aplicaciones: como la generación de energía solar y eólica, almacenamiento de baterías, calidad de energía y motores.

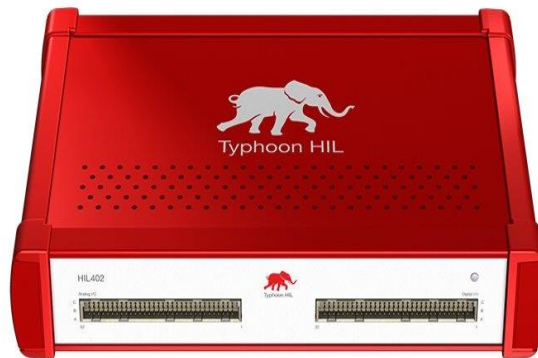


Figura 32. Typhoon HIL 402

Las principales características del Typhoon HIL son:

- Agilizar procesos de desarrollo de nuevas tecnologías como: convertidores, motores, etc.
- Ahorrar tiempo y recursos.
- Pruebas flexibles y extremadamente ágiles.
- Interfaces amigables.

En la Figura 33, se puede observar la implementación del inversor en el Typhoon HIL402. Donde el bloque Single Phase Inverter 1, tiene la topología puente onda completa para inversores monofásicos, la cual es la empleada en este trabajo. También se mide el valor RMS de la salida de tensión y corriente, el THD de la salida de tensión y corriente, que se podrá visualizar en el panel *SCADA* de la aplicación de Typhoon HILL.

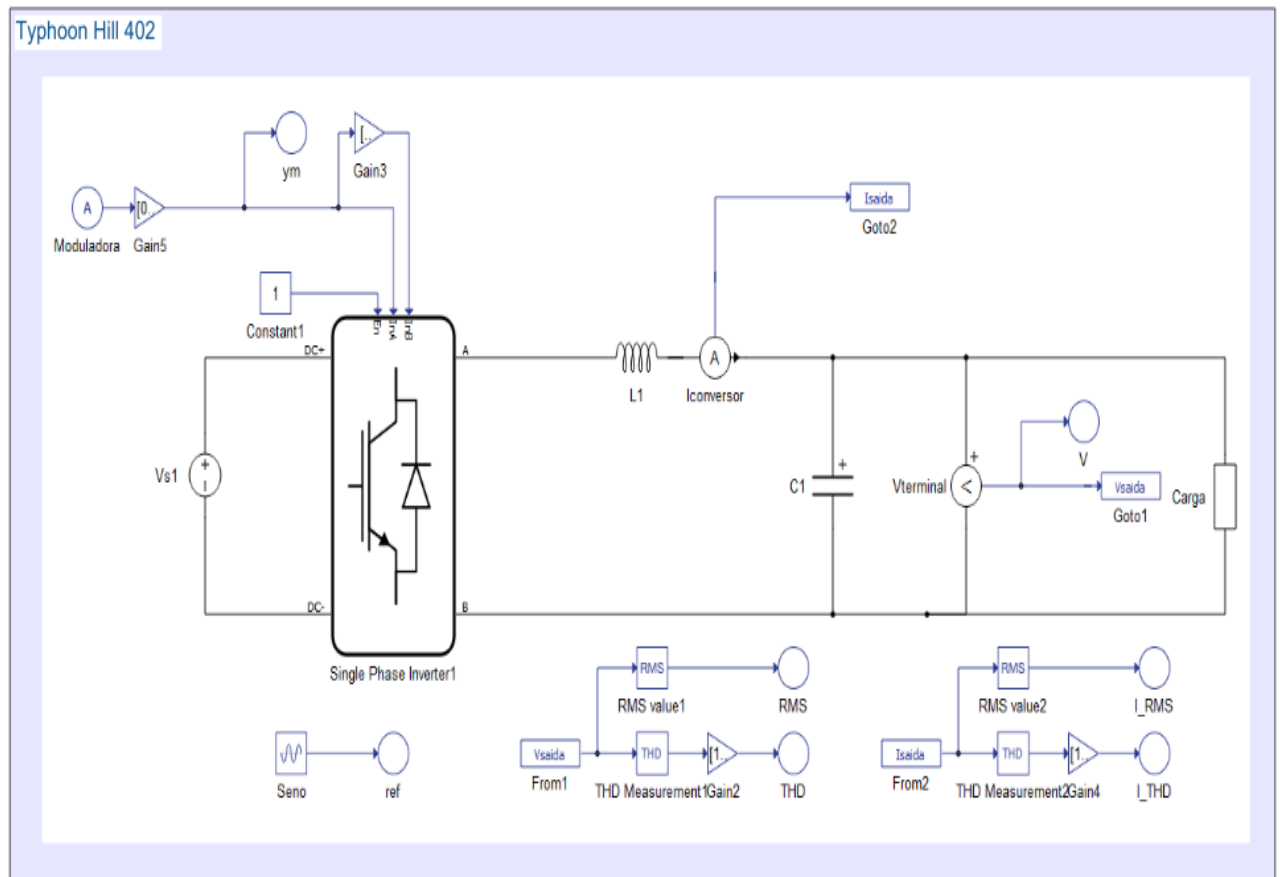


Figura 33. Implementación del inversor monofásico en el Typhoon HIL 402

5.2 Implementación del controlador

Para la implementación del controlador DMC se utilizó el sistema de hardware dSPACE, como se muestra en la Figura 34, por ser una potente placa controladora para la creación de prototipos de control.



Figura 34. dSPACE

La placa del controlador es totalmente programable por el entorno del diagrama de bloques Simulink®, como se muestra en la Figura 35. El algoritmo de control se implementó en una función de Matlab, ya que permite trabajar con algoritmo de código y simulink. El bloque DS1103DAC_C1 es un convertor digital a analógico, el cual contiene los valores del controlador y se conecta en una entrada analógica del Typhoon HILL. El bloque _DS1103ADC_C19 y DS1103ADC_C17 son convertidores analógicos a digital, contiene la señal de referencia con amplitud 1 y frecuencia 60 Hz, y la salida de corriente que es retroalimentada del Typhoon HILL, respectivamente.

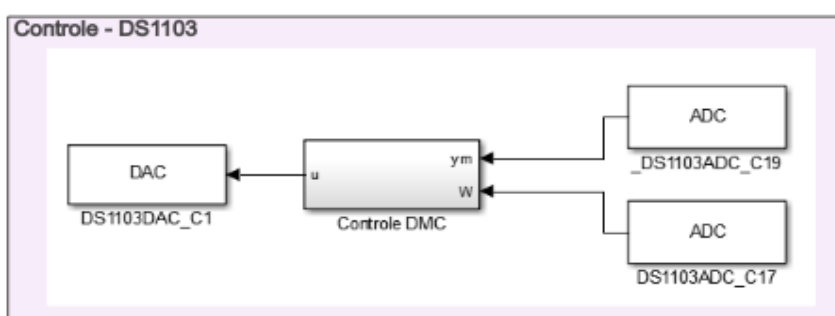


Figura 35. Programación del controlador DMC en la dSPACE

En la Figura 36, se muestra la conexión del Typhoon HIL a la izquierda y el dSPACE a la derecha.

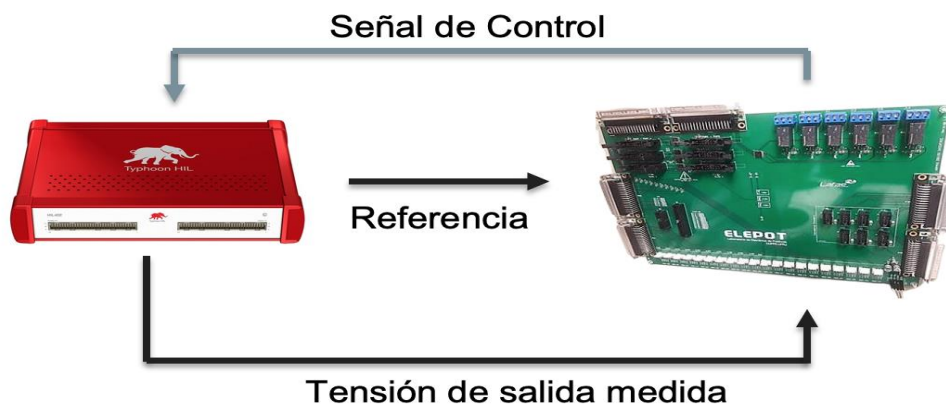


Figura 36. Conexión del Typhoon HIL con la dSPACE

En la Figura 37, se muestra la conexión física del Typhoon HIL y el dSPACE.



Figura 37. Conexión física del Typhoon HIL con la dSPACE

5.3 Análisis de Resultados

En este capítulo se valida la implementación del inversor monofásico y el controlador DMC. En la Figura 38, se puede observar que la salida de tensión sigue a la señal de referencia. La cual tiene un valor RMS de 110 V y una frecuencia de 59.5 Hz.

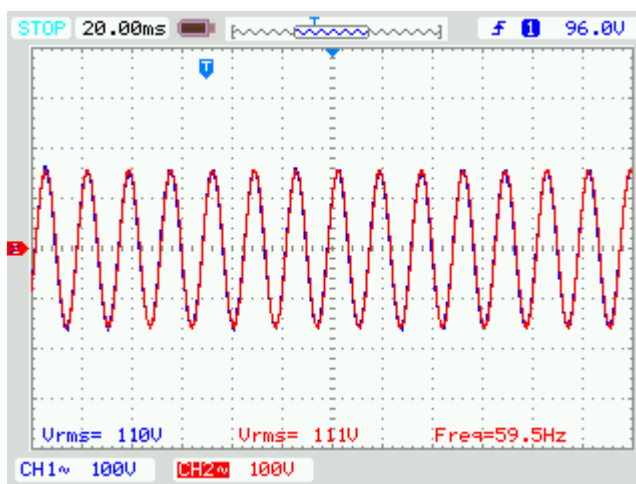


Figura 38. En azul la salida de tensión y en rojo la referencia.

En la Figura 39, se puede observar la salida de corriente, que no presenta distorsión armónica y tiene un valor RMS de la salida de corriente del inversor 9.27A.

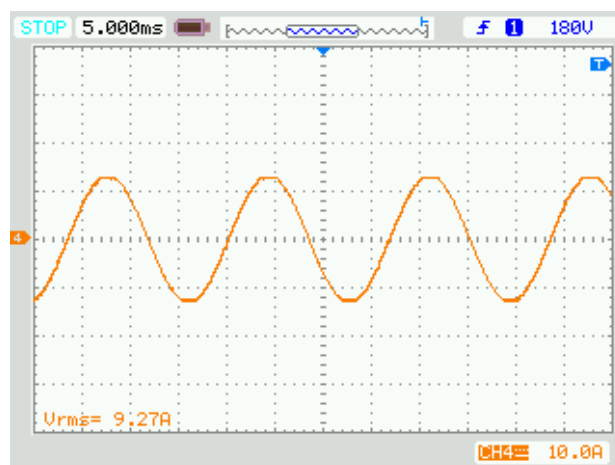


Figura 39. Salida de tensión del inversor monofásico

Como se menciona el Typhoon HIL, tiene una interfaz amigable como se muestra en la Figura 40. También se puede observar que la tensión de salida tiene un valor de 109.92 [V] y THD igual a 1.70 %, valores que están dentro de las medidas de calidad de energía.



Figura 40. Interfaz Typhoon HIL

El Typhoon HIL tiene la opción de como se muestra en la Figura 41, de mostrar las ondas que se trabajando. El primer gráfico está la referencia en rojo y la corriente de salida del inversor en verde, se puede observar que son parecidas. En el segundo gráfico esta la señal de control y en el último la salida de corriente.

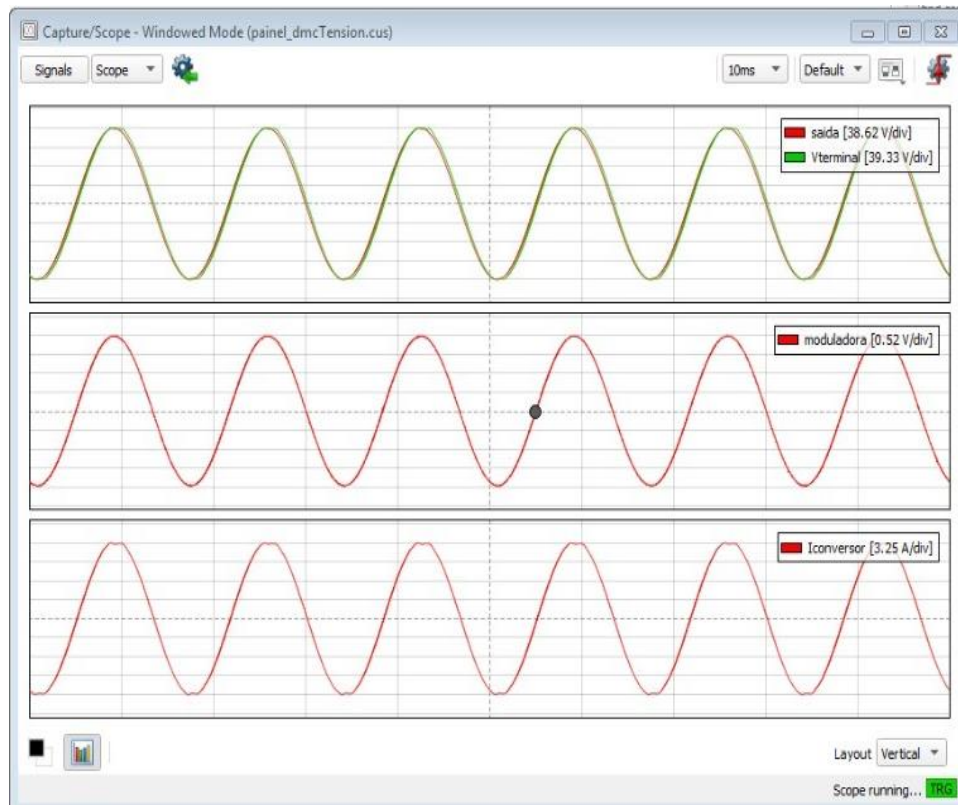


Figura 41. Scopes del Typhoon HIL

5.2.1. Variaciones de la carga

Para la validación de la implementación del controlador DMC, se varió la carga para diferentes valores, como se muestra en el diagrama de la figura . Con el objetivo de observar el comportamiento de la tensión de salida del inversor monofásico y distorsión armónica THD_V .

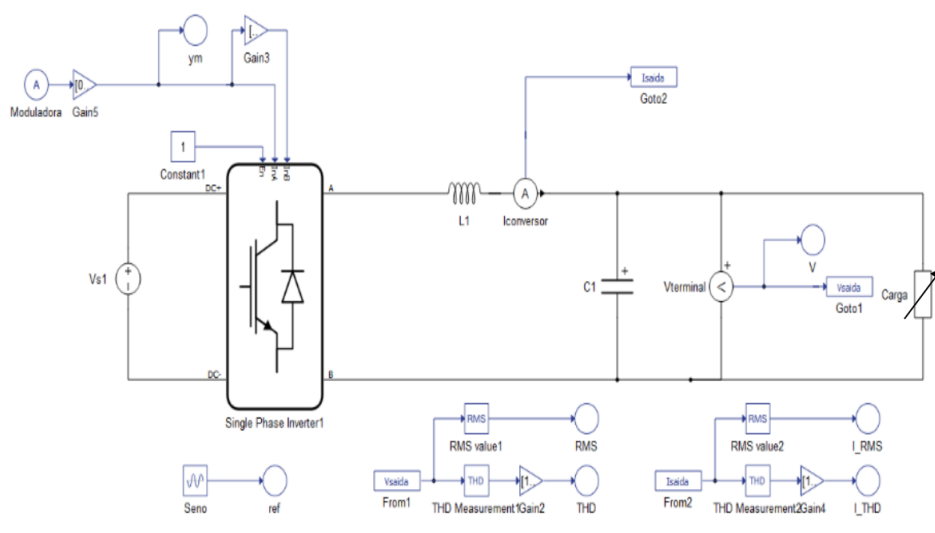


Figura 42. Diagrama del inversor monofásico, variando la carga en el Typhoon HIL

Se puede observar en las Figura 43, Figura 44 y Figura 45, que la tensión de salida sigue a la referencia, los valores de tensión y THD_v están dentro del rango de calidad de energía eléctrica.

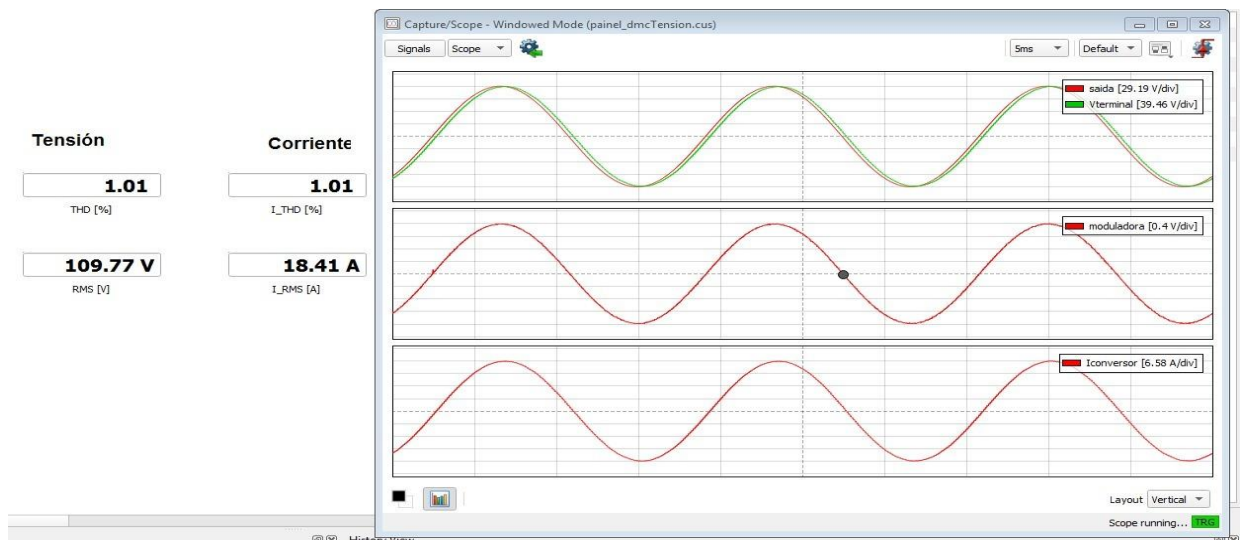


Figura 43. Variación de la carga a 6Ω

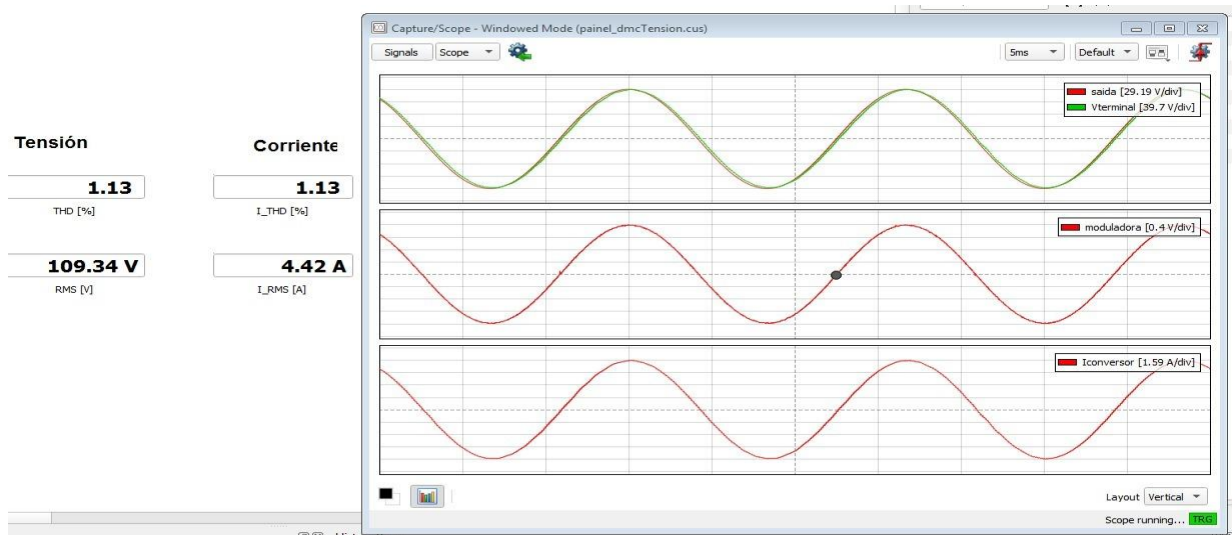


Figura 44. Variación de la carga a 25Ω

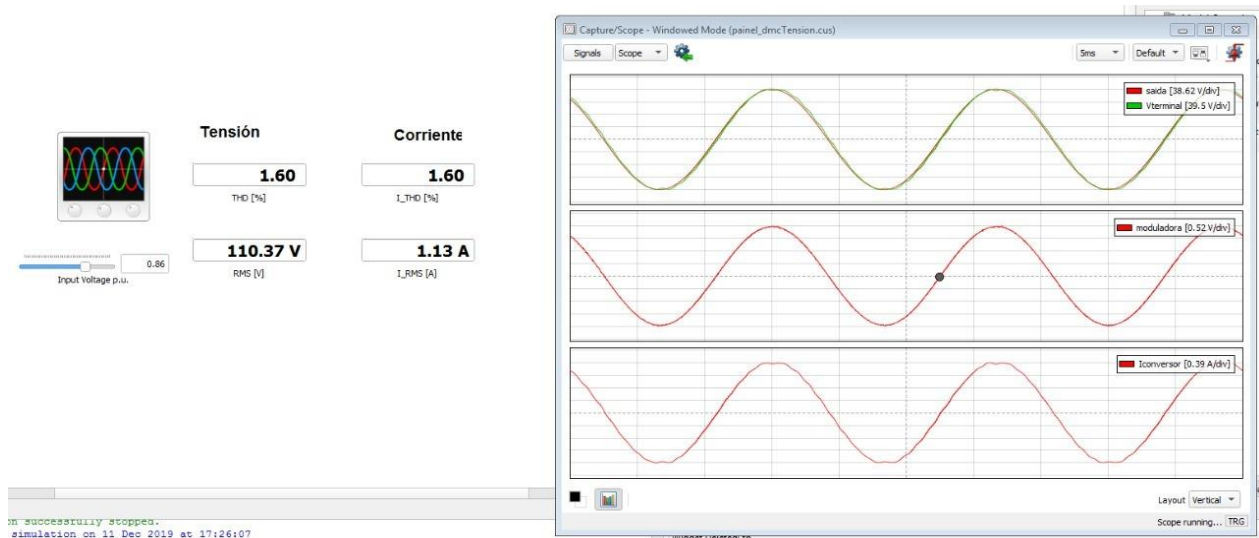


Figura 45. Variación de la carga a 100Ω

En la Tabla 9, se puede observar que el valor de tensión ante las variaciones de carga se encuentran en el rango de 109.34V a 110.37 V, cumple con lo planteado. Además el valor de THD_v no supera el 5%. El valor de la corriente es el que se ve afectado debido a la acción de control del DMC, para conseguir que la tensión de salida no varíe, ante la carga.

Tabla 9.
Desempeño del controlador DMC

Descripción	Parámetros	Carga	Carga	Carga	Carga
		$R = 12.1 \Omega$	$R = 6\Omega$	$R = 25 \Omega$	$R = 100 \Omega$
Voltaje eficaz	V_{rms}	109.92	109.77	109.34	110.37
Corriente	I_{rms}	9.34	18.41	4.42	1.13
Distorsión armónica de tensión	THD_v	1.70	1.01	1.13	1.60

5.2.2. Variaciones de la referencia

La verificación de la funcionalidad de control se centró principalmente en la observación de la variación de la referencia actual. El sistema modelado fue sometido a variaciones instantáneas de la amplitud de la señal de referencia, analizándose luego el régimen transitorio y permanente de la forma de onda obtenida. Con una tensión nominal de referencia ajustada a 110 V_{RMS}, los resultados para 0,10p.u., 0,25p.u. y 0,5p.u., así como sus transitorios, pueden observarse en las figuras Figura 46, Figura 47 y Figura 48, respectivamente. Donde 1 p.u, representa a la máxima amplitud del inversor monofásico, el cual es $\sqrt{2} \cdot 110 \text{ V}$.

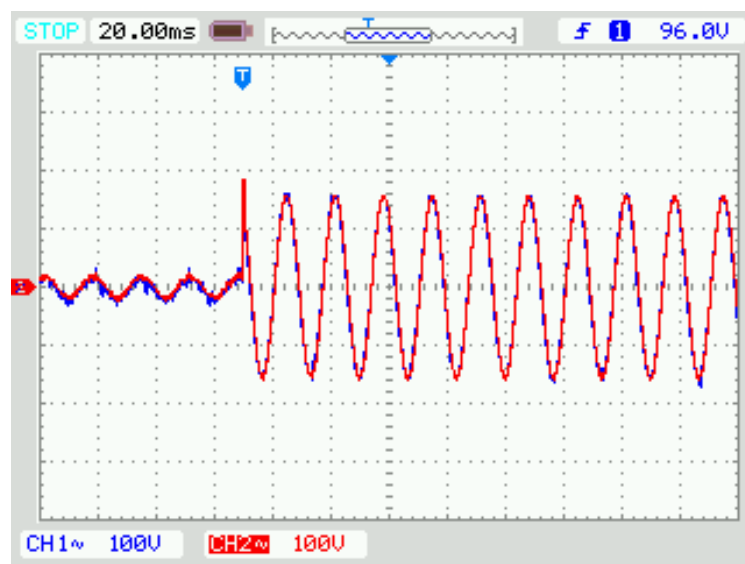


Figura 46. Referencia de 0.10 p.u a 1 p.u

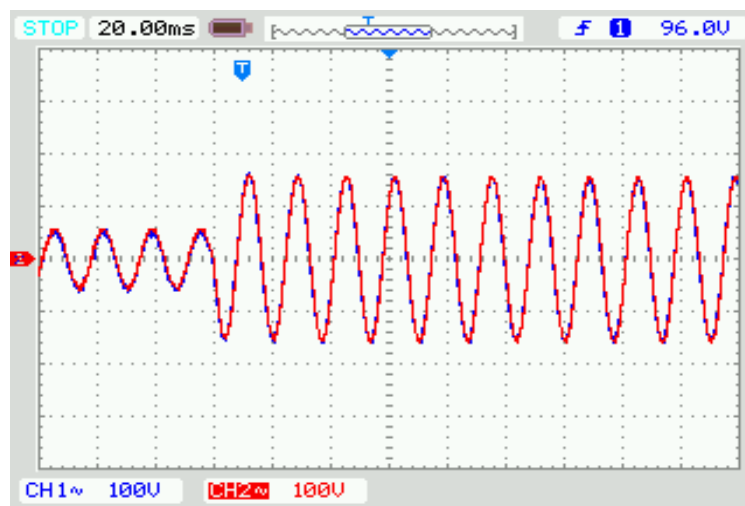


Figura 47. Referencia de 0.25 p.u a 1 pu

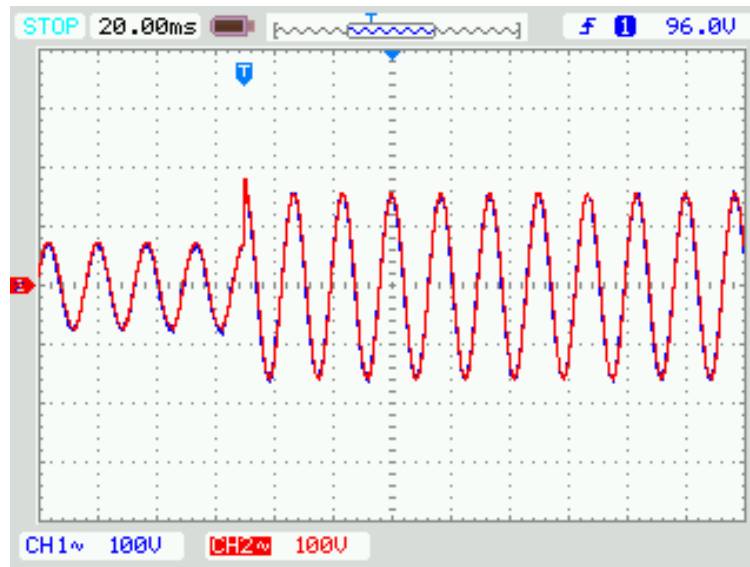


Figura 48. Referencia de 0.50 p.u a 1 pu

5.2.3. Rechazo a perturbaciones

Para la siguiente prueba, la señal de retroalimentación se sometió a un escalón de perturbación, como se muestra en la Figura 49. El propósito de esta perturbación es demostrar la capacidad del control para rechazar una perturbación. Se puede observar en la Figura 49, que el controlador DMC, rechaza las perturbaciones

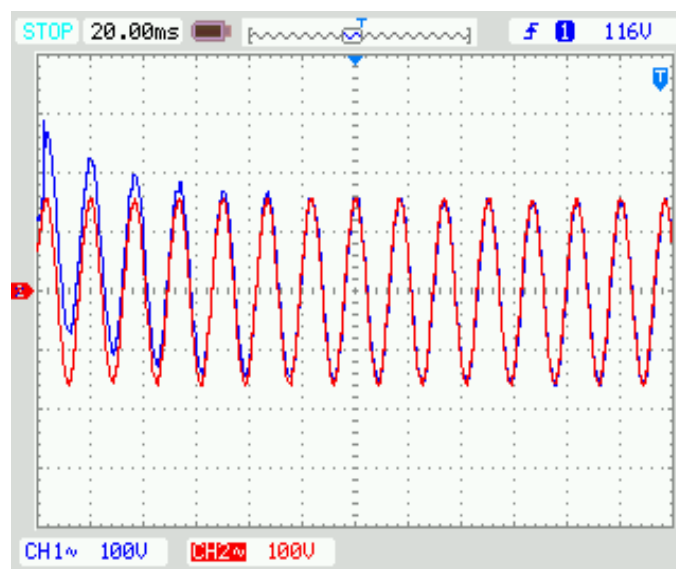


Figura 49. Rechazo de perturbaciones ante una entrada escalón

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

El extractor de máximo punto de potencia en el panel fotovoltaico tuvo una eficiencia del 99.99% para valores de temperatura 25° y una irradiación de 1000 W/m^2 cuya prueba fueron realizadas en el software de simulación en tiempo real Typhoon HIL.

Con el convertidor Boost diseñado se obtuvo una salida de tensión de 203.84V en DC, con un error de 1.88% en base a la tensión propuesta de 200 V en DC y una eficiencia del 91%.

El inversor monofásico en puente onda completa fue implementado en el simulador Typhoon HIL, el cual permite validar circuitos de potencia en tiempo real antes de ser construidos. Por otro lado, el controlador DMC se implementó en el microprocesador *Rapid Control Prototyping* dSPACE, que puede ser programado tanto en forma gráfica o algoritmos.

De los resultados obtenidos en la Tabla 9, el controlador DMC mantiene una salida de tensión dentro del rango planteado en el alcance de 105 a 115 V_{rms} y THD inferior a 5%, que están dentro de las medidas de calidad de la energía eléctrica, antes variaciones de carga.

El rendimiento del controlador DMC en el inversor monofásico en puente onda completa presenta un tiempo de establecimiento de 60 ms ante perturbaciones de un escalón menores del 50% de amplitud de la señal original.

El control DMC aplicado a los inversores es una nueva tecnología poco desarrollada en la literatura de electrónica de potencia, de acuerdo a los resultados obtenidos en este proyecto de investigación esta tecnología puede ser una base para trabajos futuros en esta área.

RECONOCIMIENTOS

Un reconocimiento a los programas de Planeamiento Energético y Programa de Eléctrica del Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería – COPPE, de la Universidade Federal do Río de Janeiro, especialmente a los profesores Carlos Duarte y Robson Dias, a los estudiantes de los laboratorios de Electrónica de Potencia – ELEPOT y el laboratorio de Fuentes Alternativas de Energía – LAFAE, por el apoyo y colaboración para el desarrollo de este proyecto.

Un reconocimiento para el Grupo de Investigación en Propagación, Control Electrónico y Networking (PROCONET), que desarrolla proyectos de investigación que sirven como incentivo para futuros proyectos.

Este proyecto es parte del proyecto “*MIRA-ESTE: Specific, innovative microgrids solutions (accounting for environmental, social, technological and economics aspects) for isolated rural areas of Ecuador*”, financiado por el gobierno de Bélgica a través de la convocatoria VLIR-USO SI 2020.

BIBLIOGRAFÍA

- Agency, I. –I. (2019). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Obtenido de A Global Energy Transformation.
- Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H. W., & Ullah, K. R. (2013). Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 738–752.
- Bordons, E. F. (2007). *Model Predictive Control*. Springer.
- Calgary, U. (25 de Mayo de 2019). *Photovoltaic system*. Obtenido de Energy Education: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_system
- Calgary, U. (28 de Mayo de 2019). *Electrical generation*. Obtenido de Energy Education: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electrical_generation
- Cervellini, M. P., Echeverria, N. I., Antoszczuk, P. D., Retegui, R. A., Funes, M. A., & Gonzalez, S. A. (2016). Optimized Parameter Extraction Method for Photovoltaic Devices Model. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 14, No. 4, 1959-1965.
- Commission, U. –E. (25 de Mayo de 2019). *UE – Energy European Commission*. Obtenido de <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy>
- Cutler, R., & Ramaker, B. (1980). *Dynamic Matrix Control-A Computer Control Algorithm*. Obtenido de In Automatic Control Conference.
- Donoso, F. O. (2016). *Diseño e implementación de una estrategia de control predictivo modulado para un inversor NPC Front-End*. Universidad de Chile. Obtenido de Universidad de Chile.
- Energética, E. d. (2018). *Balanço Energético Nacional*.

- Ertasgin, G., Whaley, D. M., Soong, W. L., & Ertugrul, N. (2016). Low-pass filter design of a current-source 1-ph grid-connected PV inverter. *International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, 1-6.
- Gutierrez, M. I. (2019). *Desarrollo de un sistema de control predictivo de la temperatura en un reactor de transesterificación*. Lima: Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Han, J., Khushalani-Solanki, S., Solanki, J., & Liang, J. (2015). Adaptive Critic Design-Based Dynamic Stochastic Optimal Control Design for a Microgrid With Multiple Renewable Resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Vol. 6, No. 6, 2694-2703.
- Jäger-Waldau, A. (2017). *Joint Research Centre (JRC), The European Commission's*.
- Joshi, M., & Vaidya, G. A. (2014). Modeling and simulation of single phase Grid connected solar photovoltaic system. *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1-6.
- Kopot, T., & Skupin, P. (2015). Adaptive dynamic matrix control with interpolated parameters. *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, 683-688.
- Li-Xia Sun, Wen, Z.-G., & Lu, S. (2016). Instability analysis and experimental setup of a full-bridge SPWM DC-AC converter. *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2331-2336.
- Mohitha A.T, S. M.-A. (2015). Design and control of renewable power system through wsn in mirogrid. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 4(5), PP.25-32.
- Pereira, P. (2016). Modelagem e avaliação de desempenho das principais técnicas de controle de MPPT empregadas na geração fotovoltaica. *XIV CEEL Conferência De Estudos Em Engenharia Elétrica*, 6.

- Ramdani, A., & Grouni, S. (2017). Dynamic matrix control and generalized predictive control, comparison study with IMC-PID. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42.
- Rodriguez, J., & Cortes, P. (2012). Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. *John Wiley and Sons*.
- SENPLADES. (s.f.). *Plan Nacional del Buen vivir 2017-2021*.
- Suquillo, G., & Alex, W. (2019). *Diseño de un control predictivo basado en modelo (MPC) para un inversor de potencia monofásico, aplicado a un generador fotovoltaico*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Vazque, S., Rodriguez, J., M. Rivera, L. G., & Norambuena, M. (2017). Model Predictive Control for Power Converters and Drives: Advances and Trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 64, No. 2, 935-947.
- Muñoz, A. (2016). *Emulación de un Aerogenerador Conectado a la red a través de un Sistema Experimental Back-To-Back mediante la técnica "Hardware In The Loop"*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Quirino, F., Mino, G., Graniel, B., Peralta, E., Guerrero, & Fermi. (2016). Simulación "Hardware In The Loop" del Control de Velocidad de un Vehículo Eléctrico con Motores de Imán Permanente. *Pistas Educativas*, 19.
- Horst, D., Bondarik, R., & Pilatti. (2018). Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no brasil. *Interciencia*. 43. 680-688., 43. 680-688.
- JKM300M-72. (s.f.). *Jinko Solar*. Obtenido de www.jinkosolar.com:
https://www.jinkosolar.com/ftp/SP-MKT-300M_v1.0_rev2012.pdf

Silva, L. R. (2015). *Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.

Ida, E. T. (2019). *Análise da viabilidade técnica e econômica de uma geração fotovoltaica com sistema de armazenamento aplicado à geração distribuída residencial*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

R. Ortega, O. C. (2015). Modeling and Design of Photovoltaic Inverters for Island Mode Operation Within a Microgrid. *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)*, pp 1-6.

IRENA. (2019). *Renewable Energy Statistics 2019*. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency.

ANEXOS