



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES



Trabajo Especial de Grado

**INYECCIÓN DE ENERGÍA A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE CORRIENTE
ALTERNA MEDIANTE EL USO DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE
POTENCIA**

Autores

Carvajal Paparella, Gian Marco

D'Andrea Croce, Adriana Valeria

Tutor

Prof. Antonio Millán

Naguanagua, Febrero de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES



Trabajo Especial de Grado

**INYECCIÓN DE ENERGÍA A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE CORRIENTE
ALTERNA MEDIANTE EL USO DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE
POTENCIA**

Autores

Carvajal Paparella, Gian Marco

D'Andrea Croce, Adriana Valeria

Tutor

Prof. Antonio Millán

Trabajo Especial de Grado presentado a la ilustre Universidad de Carabobo, como credencial al mérito para optar por el título de Ingeniero Electricista.

Naguanagua, Febrero de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

INYECCIÓN DE ENERGÍA A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE CORRIENTE ALTERNA MEDIANTE EL USO DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

Autores:

Gian Marco Carvajal Paparella

Adriana Valeria D'Andrea Croce

Tutor:

Ing. Antonio Millán

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron dos métodos de control de inyección de energía eléctrica, denominados marco de referencia síncrono (SRF) y control directo de potencia (DPC). Por medio de simulaciones y análisis entre ambos métodos, se consiguió que el método DPC seguía mejor las referencias de potencia que el SRF, siendo el mayor error de DPC de un 3.19 % y el de SRF de un 7 %. Se construyó un módulo experimental para la inyección de energía utilizando convertidores electrónicos de potencia y el método de control DPC, logrando inyectar energía a una red eléctrica de corriente alterna en lazo abierto y lazo cerrado a partir de un bus DC de 12 V.

Palabras clave: Inyección de energía, control directo de potencia, marco de referencia síncrono, DPC, SRF, convertidores electrónicos.

Naguanagua, Febrero de 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado **“INYECCIÓN DE ENERGÍA A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE CORRIENTE ALTERNA MEDIANTE EL USO DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.”**, realizado por los bachilleres: **Carvajal Paparella, Gian Marco. C.I.: N° V-19.964.056** y **D’Andrea Croce, Adriana Valeria. C.I.: N° V-19.600.899** hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Antonio Millán
Tutor

Prof. Aída Pérez
Jurado

Prof. Ledy Guerra
Jurado

Naguanagua, Febrero de 2015

Agradecimientos

A Dios, a Simón, a María, a Digo, a Simón A, a Pasquale, a Franca, a Gigliola, a Rosella, a Víctor, a Alex, a Vivian, a Rene, a Maritza, a Oscar E, a Marian, a Susana, a Oscar, a Oscar E, a Tachi, a Mayra, a Yessika, a José A, a Marisol, a Rosa, a Thomas, a Ginnett, a Ángel, a Laudelina, a Ángel A, a Andrea, a Lope, a Mercedes, a Mima, a Sosa, a Juan Carlos Jiménez, a Antonio Millán y a todas aquellas personas que de una manera u otra hayan contribuido a la elaboración de este trabajo especial de grado.

A todos ustedes, gracias.

Gian Marco Carvajal

A mis padres, que siempre han estado ahí con niveles de preocupación más allá de los humanamente posibles. A Daniela, gracias por el buen humor. A mis nonnos. A Gian, que no supo en lo que se metió. A la señora Marilisa, por recibirme en su hogar. Al profesor Antonio Millán, gracias.

Al Instituto de Ingeniería, por el préstamo de equipos sin los cuales este trabajo especial de grado no podría haber sido realizado.

A Francisco Sosa y al señor Armando, por permitirnos usar sus equipos de laboratorio y estar siempre al pendiente y a la orden.

A Kevin, Eva y Claudia, por contestar siempre el teléfono y estar siempre que los necesitamos.

A las profesoras Aida Pérez y Ledy Laura Guerra, por su pronta disposición e interés por ser el jurado de nuestro trabajo especial de grado.

Adriana D'Andrea

Dedicatoria

A Adriana D'Andrea, por creer que este trabajo especial de grado jamás iba a ser terminado.

Gian Marco Carvajal

Índice general

| | |
|--|------------|
| <i>Índice general</i> | <i>i</i> |
| <i>Índice de tablas</i> | <i>iii</i> |
| <i>Índice de figuras</i> | <i>iv</i> |
| 1 Capítulo 1 | 1 |
| 1.1 El problema. | 1 |
| 1.2 Justificación | 3 |
| 1.3 Objetivo general | 4 |
| 1.4 Objetivos específicos | 4 |
| 1.5 Alcance | 5 |
| 1.6 Limitaciones | 5 |
| 2 Capítulo 2 | 7 |
| 2.1 Antecedentes | 7 |
| 2.2 Bases Teóricas | 9 |
| 2.2.1 Inyección de energía a una red eléctrica | 9 |
| 2.2.2 Convertidor electrónico de potencia | 11 |
| 2.2.3 Métodos de control de inyección de potencia mediante convertidores electrónicos. | 22 |
| 2.2.4 Transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor | 33 |
| 3 Capítulo 3 | 35 |
| 3.1 Tipo de investigación | 35 |
| 3.2 Metodología utilizada | 35 |
| 3.2.1 Simulación de los métodos de control | 36 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.2.2 | Diseño del equipo de inyección de energía | 36 |
| 3.2.3 | Protecciones..... | 45 |
| 3.2.4 | Adquisición de los equipos y ensamblaje de las partes | 46 |
| 3.2.5 | Ejecución de pruebas de funcionamiento | 47 |
| 3.2.6 | Ensayos de inyección de energía | 47 |
| 3.3 | Población y muestra | 47 |
| 3.4 | Técnicas de recopilación, procesamiento y análisis de datos..... | 47 |
| 4 | Capítulo 4..... | 53 |
| 4.1 | Marco de referencia Síncrono (SRF)..... | 55 |
| 4.2 | Control Directo de Potencia (DPC)..... | 62 |
| 4.3 | Resultados de simulación para SRF y DPC | 72 |
| 4.4 | Inyección de energía | 74 |
| 4.4.1 | Sistema eléctrico sin inyección de energía | 75 |
| 4.4.2 | Sistema eléctrico con inyección de energía a lazo abierto | 77 |
| 4.4.3 | Sistema eléctrico con inyección de energía a lazo cerrado | 82 |
| | Conclusiones..... | 87 |
| | Recomendaciones | 90 |
| | Referencias..... | 91 |
| | Anexos..... | 93 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Tecnologías actuales para la generación distribuida | 10 |
| Tabla 2.2 Vectores de tensión del convertidor que cumplen los requisitos de control de potencia..... | 27 |
| Tabla 2.3 Tabla de conmutación óptima para DPC de convertidores de 2 niveles | 27 |
| Tabla 2.4 Signo de los cambios en P y Q en función del vector de tensión del convertidor aplicado y del sector k. | 30 |
| Tabla 2.5 Tabla de conmutación óptima para DPC de convertidores de 2 niveles | 31 |
| Tabla 4.1 SRF: Resumen de resultados de potencia..... | 72 |
| Tabla 4.2 DPC: Resumen de resultados de potencia | 72 |
| Tabla 4.3 SRF: Resumen de resultados de THD | 73 |
| Tabla 4.4 DPC: Resumen de resultados de THD..... | 73 |
| Tabla 4.5 SRF: Resumen de resultados de tiempos de estabilización..... | 73 |
| Tabla 4.6 DPC: Resumen de resultados de tiempos de estabilización | 74 |
| Tabla 4.7 Ensayo sin inyección: Cálculos de THD y potencia..... | 77 |
| Tabla 4.8 Ensayo con inyección a lazo abierto: Cálculos de THD y potencia | 81 |
| Tabla 4.9 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Cálculos de THD y potencia | 85 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Esquema básico de un convertidor electrónico de potencia..... | 12 |
| Figura 2.2 Esquema básico de un inversor trifásico de onda completa..... | 13 |
| Figura 2.3 Estados de conmutación de un puente convertidor de dos niveles. | 14 |
| Figura 2.4 Relación entre los vectores de un convertidor electrónico de potencia | 15 |
| Figura 2.5 Equivalente monofásico de un convertidor electrónico de potencia..... | 16 |
| Figura 2.6 Diagrama fasorial con factor de potencia unitario | 17 |
| Figura 2.7 Posición instantánea de los fasores | 20 |
| Figura 2.8 Condición límite para la correcta operación de un convertidor | 20 |
| Figura 2.9 Diagrama de bloques del control orientado al voltaje..... | 22 |
| Figura 2.10 Diagrama fasorial del VOC. Transformación de coordenadas de corriente, línea y voltaje del convertidor desde el sistema coordenado estacionario α - β al sistema coordenado rotario d-q..... | 24 |
| Figura 2.11 Diagrama de bloques del control directo de potencia | 25 |
| Figura 2.12 Vectores de tensión de un convertidor de 2 niveles | 26 |
| Figura 2.13 Circuito equivalente y diagrama fasorial de un convertidor conectado a la red | 28 |
| Figura 2.14 Sectores para la formulación basada en tensiones | 29 |
| Figura 2.15 (a) Característica del MOSFET (b) Característica ideal del MOSFET | 33 |
| Figura 2.16 MOSFET (de canal n) con diodo parásito en anti paralelo | 34 |
| Figura 3.1 Esquema básico de inyección de energía..... | 36 |
| Figura 3.2 Esquema de potencia..... | 37 |
| Figura 3.3 Montaje del sistema de potencia. | 37 |
| Figura 3.4 Esquema de la primera etapa de la red..... | 38 |
| Figura 3.5 Esquema de la segunda etapa de la red | 38 |
| Figura 3.6 Esquema de la tercera etapa de la red | 39 |
| Figura 3.7 Autotransformador trifásico del esquema de potencia..... | 39 |
| Figura 3.8 Esquema de la carga..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9 Esquema de inyección de energía mediante convertidores electrónicos de potencia..... | 40 |
| Figura 3.10 Esquema de control DPC utilizado | 41 |
| Figura 3.11 Montaje del esquema de control y circuito de disparo..... | 42 |
| Figura 3.12 Esquema del equipo de inyección de energía..... | 43 |
| Figura 3.13 a) Drivers de disparo para los interruptores electrónicos b) Interruptores electrónicos (MOSFET's)..... | 44 |
| Figura 3.14 Banco de baterías usado como bus DC para el equipo de inyección. | 45 |
| Figura 3.15 Esquema de protecciones | 46 |
| Figura 3.16 Esquema de adquisición de datos | 48 |
| Figura 3.17 a) Tarjeta de sensores de Efecto Hall usada para la medición de las corrientes del convertidor. b) Sensores de Efecto Hall para la medición de las corrientes de la red. | 49 |
| Figura 3.18 Transformadores de tension, usados como sensores para las tensiones de fase de la red..... | 49 |
| Figura 3.19 Esquema de acondicionamiento de datos..... | 50 |
| Figura 3.20 a) Montaje del circuito de protección y del circuito de adquisición de datos. b) FPGA utilizada para la adquisición y almacenamiento de datos. | 51 |
| Figura 4.1 Referencia de potencia a seguir por los métodos de control | 54 |
| Figura 4.2 Esquema del Marco de Referencia Síncrono (SRF)..... | 55 |
| Figura 4.3 SRF: Bloque de carga..... | 56 |
| Figura 4.4 SRF: Bloque SRF | 56 |
| Figura 4.5 SRF: Potencia activa de la carga | 57 |
| Figura 4.6 SRF: Potencia reactiva de la carga | 57 |
| Figura 4.7 SRF: Potencia activa entregada al sistema | 58 |
| Figura 4.8 SRF: Potencia reactiva entregada al sistema..... | 58 |
| Figura 4.9 SRF: Potencia activa entregada por la red..... | 59 |
| Figura 4.10 SRF: Potencia reactiva entregada por la red | 59 |
| Figura 4.11 SRF: Corriente del convertidor | 60 |
| Figura 4.12 SRF: Corriente de la red..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.13 SRF: Distorsión armónica total de la corriente del convertidor..... | 61 |
| Figura 4.14 SRF: Distorsión armónica total de la corriente de la red | 61 |
| Figura 4.15 Esquema del Control Directo de Potencia (DPC)..... | 62 |
| Figura 4.16 DPC: Bloque de carga..... | 63 |
| Figura 4.17 DPC: Bloque PRUEBAS | 63 |
| Figura 4.18 DPC: Bloque DPC | 64 |
| Figura 4.19 DPC: Bloque Calculador de potencia | 64 |
| Figura 4.20 DPC: Bloque Selector de sector..... | 65 |
| Figura 4.21 DPC: Bloque Convertidor | 65 |
| Figura 4.22 DPC: Potencia activa de la carga | 66 |
| Figura 4.23 DPC: Potencia reactiva de la carga | 66 |
| Figura 4.24 DPC: Potencia activa entregada al sistema | 67 |
| Figura 4.25 DPC: Potencia reactiva entregada al sistema..... | 67 |
| Figura 4.26 DPC: Potencia activa entregada por la red..... | 68 |
| Figura 4.27 DPC: Potencia reactiva entregada por la red..... | 68 |
| Figura 4.28 DPC: Corriente del convertidor | 69 |
| Figura 4.29 DPC: Corriente de la red..... | 69 |
| Figura 4.30 DPC: Potencia activa del calculador de potencia del esquema y potencia activa del bloque de medición de potencia en coordenadas abc..... | 70 |
| Figura 4.31 DPC: Potencia reactiva del calculador de potencia del esquema y potencia activa del bloque de medición de potencia en coordenadas abc..... | 70 |
| Figura 4.32 DPC: Distorsión armónica total de la corriente del convertidor | 71 |
| Figura 4.33 DPC: Distorsión armónica total de la corriente de la red..... | 71 |
| Figura 4.34 Ensayo sin inyección: Tension de fase y corriente del generador | 75 |
| Figura 4.35 Ensayo sin inyección: Transformada discreta de Fourier de la tension del sistema | 75 |
| Figura 4.36 Ensayo sin inyección: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador | 76 |
| Figura 4.37 Ensayo sin inyección: Potencia activa y reactiva entregada por el generador (+)..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.38 Ensayo con inyección a lazo abierto: Tension de fase y corriente del generador | 78 |
| Figura 4.39 Ensayo con inyección a lazo abierto: Tension de fase y corriente del convertidor | 78 |
| Figura 4.40 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de Fourier de la tension del sistema | 79 |
| Figura 4.41 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador | 79 |
| Figura 4.42 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de fourier de la corriente del convertidor | 80 |
| Figura 4.43 Ensayo con inyección a lazo abierto: Potencia activa y reactiva entregada por el generador (+)..... | 80 |
| Figura 4.44 Ensayo con inyección a lazo abierto: Potencia activa y reactiva entregada por el equipo de inyeccion (+) | 81 |
| Figura 4.45 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Tension de fase y corriente del generador | 82 |
| Figura 4.46 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Tension de fase y corriente del convertidor | 83 |
| Figura 4.47 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la tension del sistema | 83 |
| Figura 4.48 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador | 84 |
| Figura 4.49 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la corriente del convertidor | 84 |
| Figura 4.50 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Potencia activa y reactiva entregada por el equipo de inyeccion (+) | 85 |

Introducción

Las áreas de aplicación de los convertidores electrónicos de potencia se siguen expandiendo gracias a los adelantos en la tecnología de semiconductores. Como se ha observado en las décadas recientes, una porción en crecimiento de la energía eléctrica generada es convertida a través de rectificadores, antes de ser utilizada al final de la carga.

El diseño de los equipos de conversión de potencia precisa de numerosas disciplinas de la ingeniería eléctrica. La electrónica de potencia incluye aplicaciones de la teoría de circuitos, la teoría de control, electrónica, electromagnetismo, microprocesadores (para control) y transferencia de calor. Los avances conseguidos en la capacidad de conmutación de los semiconductores, combinados con el interés por mejorar el rendimiento y las prestaciones de los dispositivos eléctricos han convertido a la electrónica de potencia en un área de la ingeniería electrónica de rápido crecimiento.

Gracias a estos avances, es posible realizar la inyección de energía a una red eléctrica de corriente alterna usando convertidores electrónicos de potencia.

A continuación se indica la metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo de grado para alcanzar el objetivo principal de este proyecto titulado: Inyección de energía a una red eléctrica de corriente alterna mediante convertidores electrónicos de potencia.

En el capítulo 1, se describe el planteamiento del problema y su justificación, los objetivos a realizar, el alcance de la investigación y las limitaciones de la misma.

En el capítulo 2, se mencionan los antecedentes del problema, trabajos e investigaciones anteriores relacionados con problema planteado. Se indican también todas las bases teóricas necesarias para poder realizar el trabajo.

El capítulo 3, contiene la metodología a emplear, donde se especifica el tipo de investigación, la población y la muestra, así como también las técnicas empleadas y las fases a desarrollar para dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos de cada una de las fases planteadas en el capítulo 3, así como un análisis exhaustivo de los mismos para poder alcanzar todos los objetivos propuestos.

Finalmente, se presentan las conclusiones que se alcanzaron luego de realizar el análisis de los resultados y las recomendaciones para futuros trabajos.

Capítulo 1

Planteamiento del problema

1.1 El problema.

El consumo energético de la sociedad se ha incrementado a través de los años como consecuencia del desarrollo, el incremento poblacional y de los avances tecnológicos orientados a mejorar la calidad de vida y bienestar de las personas. Actualmente, la energía eléctrica es la segunda energía más consumida en el mundo, representando un 17,7% de la energía consumida total, siendo la primera el petróleo con un 41,2%. De este porcentaje, la energía eléctrica abastece en un 41,5% a cargas industriales, 1,6% en transporte y 56,9% entre cargas residenciales, servicios públicos y otras [1].

La energía eléctrica se obtiene de centrales de generación, que transforman otros tipos de energía en electricidad, seguidamente es transportada desde estos puntos a través de líneas de transmisión a lo largo de todo el país. En Venezuela, la energía se obtiene de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas para, en conjunto, conformar el sistema interconectado nacional, el cual se desarrolló con el objetivo de abastecer todos los requerimientos eléctricos del país.

El crecimiento poblacional de Venezuela ha resultado en un incremento de la demanda eléctrica de aproximadamente 6% anual esta última década, porcentaje que

Capítulo 1. Planteamiento del problema.

supera el ritmo de crecimiento en la oferta eléctrica que se ha estado instalando [2]. La disparidad entre el incremento de la oferta y la demanda de energía eléctrica se ha venido incrementando a un ritmo de 7% anual desde el 2005 [3].

Una de las razones por las que existe un déficit de energía eléctrica en el país, es que las centrales termoeléctricas se encuentran trabajando al 42% de su capacidad [4], esto combinado con la dependencia actual de las centrales hidroeléctricas que suministran el 63% de la energía del país [5], de forma que, de darse las condiciones climáticas adecuadas, Venezuela se quedaría sin servicio eléctrico. Pero el problema no solo involucra la generación, en 2010 se reportó que existían líneas de transmisión que estaban transmitiendo 1.000 MW por encima de su capacidad durante las horas pico, lo cual implicaba sobrecargas que ocasionaron la apertura de los sistemas de protección de las líneas lo cual resultó en la discontinuidad del servicio eléctrico, afectando a 15 estados del país [6].

Todo lo anterior mencionado, indica que se requieren soluciones que aligeren la carga del sistema eléctrico nacional en las horas de alta demanda o la adaptación del sistema existente a los requerimientos actuales de demanda de energía. Por lo que se propusieron como soluciones la instalación de centrales termoeléctricas, redistribuciones de carga a lo largo del país, reducción de actividades en las industrias, generación distribuida e importación de energía.

Las soluciones propuestas no han resultado óptimas por las razones siguientes. La instalación de nuevas centrales termoeléctricas implica un aumento del consumo interno de productos derivados del petróleo y del gas natural, provocando una caída en las exportaciones venezolanas. Las redistribuciones de carga han generado un aumento en la duración promedio anual de interrupción del servicio eléctrico, desde 1,54 horas en el 2007 a 16,47 horas en el 2012 [7]. Las limitaciones a las empresas y la generación distribuida han resultado en la compra de generadores diésel, lo que se traduce en aumentos de emanaciones de CO₂ al ambiente cuando Venezuela ocupa el segundo lugar de América con mayor incremento de emanaciones desde el año 2000 al 2012 después de

Chile [8]; y finalmente, la importación de energía representa un paso en retroceso en la economía del país, habiendo pasado de exportadores de energía a la necesidad de importar.

Con todo esto, se propone un equipo que pueda ser utilizado para inyectar energía a sistemas eléctricos en las horas de alta demanda a manera de aligerar la carga del sistema eléctrico nacional, y evitar la saturación de las líneas de transmisión y las consecuencias de las soluciones actualmente en ejecución mencionadas anteriormente.

La realización de este proyecto involucra dificultades técnicas, tales como el diseño del equipo, simulaciones de esquemas de inyección de energía a la red, diseño de métodos de control de potencia para inyección de energía mediante convertidores, realización de algoritmos de control de inyección de energía y construcción del equipo.

1.2 Justificación

La energía es necesaria para aquellos países cuya meta es reducir la pobreza, mejorar la salud de sus ciudadanos, incrementar la productividad, acrecentar la competitividad y promover el crecimiento económico; y es de especial importancia para los países en desarrollo.

Con el equipo propuesto, se lograría que la capacidad del sistema eléctrico fuese más aprovechable mediante la nivelación de las curvas de demanda y el rediseño de las técnicas de dimensionamiento de equipos en todo el sistema eléctrico, esto debido a que el equipo propuesto permitiría el almacenamiento de energía del sistema eléctrico nacional en las horas de baja demanda, para que luego pueda ser inyectada al sistema en las horas de alta demanda. Es un paso adelante hacia el concepto de sistemas inteligentes de energía eléctrica.

Además, se cubriría parcial o totalmente la carga en horas pico de las industrias, cubriendo la demanda que se ha restringido por la empresa de suministro eléctrico CORPOELEC en las horas de 11 am a 4 pm y de 6 pm a 10 pm [9], lo que a su vez reduciría el empleo de generadores diésel mediante la sustitución u operación en paralelo con este equipo.

Capítulo 1. Planteamiento del problema.

Se evitarían las multas aplicadas a aquellas industrias que excedan la demanda máxima permitida a las horas pico antes mencionado.

También, se permitiría mantener, e inclusive ampliar, las actividades operativas de las industrias que han disminuido su producción por poseer alta demanda de potencia, lo que permitiría una mejora en la economía del país y abriría caminos al desarrollo.

Se lograría el aprovechamiento de la energía almacenada de fuentes de generación alternativas en los momentos de las mejores condiciones climáticas, permitiendo disminuir la dependencia de las fuentes de energía convencionales.

Se contribuiría con la generación de conocimientos pertinentes a la línea de investigación de electrónica de potencia, del departamento de electrónica y comunicaciones de la escuela de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

1.3 Objetivo general

- Realizar la inyección de energía al sistema eléctrico de corriente alterna utilizando convertidores electrónicos de potencia.

1.4 Objetivos específicos

- Analizar los métodos de control de potencia para convertidores electrónicos de potencia a través de simulaciones para la selección del método a ser implementado.
- Construir el módulo base para el sistema de inyección de energía.
- Aplicar el equipo de inyección de energía a un sistema eléctrico de corriente alterna.

1.5 Alcance

Con el presente trabajo especial de grado, se sentaran las bases para realizar el diseño de un equipo de inyección de energía y la construcción del prototipo dependerá de la disponibilidad de recursos para adquirir los componentes, materiales y/o equipos necesarios.

De presentarse las dificultades mencionadas para la construcción, se hará uso de un equipo existente y disponible, investigando si es posible adecuarlo a los planteamientos del trabajo de grado y encontrándose sujeto a las condiciones de funcionabilidad y limitaciones del mismo.

De igual forma, se realizaran ensayos a nivel de simulación y su implementación se llevará a cabo de ser posible la construcción del equipo o la utilización del existente.

1.6 Limitaciones

Disponibilidad económica y adquisición del material requerido para la construcción del sistema.

Capítulo 1. Planteamiento del problema.

Capítulo 2

Antecedentes y Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Se realizó una extensa investigación en medios digitales e impresos, con el objetivo de encontrar publicaciones, libros, papers, documentos o investigaciones que sirvieran como base a desarrollar para el proyecto de grado “Inyección de Energía a una Red Eléctrica de Corriente Alterna mediante Convertidores Electrónicos de Potencia”.

Aller, J.M, Bueno, A. [2006], Control Directo de Potencia Activa y Reactiva Mediante Vectores Espaciales. Universidad Central de Venezuela.

Se realizó la comparación de dos técnicas de control vectorial que permiten regular la inyección de potencia activa y reactiva instantánea en un sistema de potencia. El primer método siendo el Control Directo de Par (DTC por sus siglas en ingles) y el segundo una propuesta desarrollada por los autores que utiliza la optimización del vector espacial de la tensión del puente convertidor para reducir el error medio cuadrático de las potencias instantáneas.

Capítulo 2. Antecedentes y Marco Teórico.

Este trabajo fue de utilidad para comparar diferentes métodos de control para inyectar energía a la red y poder seleccionar adecuadamente los métodos que serían objeto de estudio en el proyecto especial de grado.

García C. Joaquín E. [2007]. Control Directo de Potencia de Convertidores Electrónicos Conectados a la Red. Universidad Carlos III de Madrid.

Se desarrolló una nueva estrategia de Control Directo de Potencia para convertidores multinivel que integra el control de la tensión en los puntos intermedios del enlace de continua para evitar la inclusión de reguladores adicionales. Se confirmó la validez del método mediante su implementación en tiempo real en un banco de ensayos en laboratorio.

Esta investigación sentó las bases teóricas para poder realizar la inyección de energía a la red eléctrica de manera controlada.

Carballo, R.E. Núñez, R.O. [2013] Design and Implementation of a Three-Phase DC-AC Converter for Microgrids Based on Renewable Energy Sources. IEEE Latin American Transactions.

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación de un convertidor CC-CA para micro redes eléctricas basada en fuentes renovables de energía. Para la adecuada operación en lazo cerrado del convertidor CC-CA se propuso una estructura de control en tiempo discreto DSIM en ejes sincrónicos dq y un procedimiento de proyecto sistemático de los compensadores utilizados en la misma. Los resultados obtenidos, hacen que este convertidor CC-CA sea totalmente adecuado para la operación con generadores sincrónicos o asincrónicos auto excitados, con el objetivo de aportar energía eléctrica a una micro red, de forma confiable y con buena calidad.

Esta investigación sirvió como preámbulo para realizar el montaje del equipo de inyección a la red eléctrica a partir de un bus DC.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Inyección de energía a una red eléctrica

La inyección de energía a una red se realiza mediante la conexión en paralelo de un equipo capaz de suministrar energía eléctrica, de manera total o parcial, para alimentar o satisfacer las necesidades de demanda de potencia. El proceso de suministrar energía a una red eléctrica se puede lograr a gran escala (generación centralizada) o a pequeña escala (generación distribuida).

2.2.1.1 Generación centralizada

En este tipo de sistemas, las centrales eléctricas se encuentran en los lugares con mayor potencial de generación e interconectadas entre sí a través de líneas de transmisión largas, esto quiere decir que las centrales no se encuentran ubicadas necesariamente en las cercanías de los centros de carga, lo cual conlleva a la necesidad de un sistema de transmisión de energía y una interconexión de las centrales eléctricas más robustos.

2.2.1.2 Generación distribuida

El DPCA (Distribution Power Coalition of America) la define como cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o la red de transporte o distribución. Por otro lado. La Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency) considera como GD, únicamente, la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como los motores, mini y micro turbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica.

Algunas de las tecnologías actuales para la generación distribuida son presentadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tecnologías actuales para la generación distribuida

| | | |
|----------------------------|--------------|---|
| Tecnologías de GD | Maduras | Motor alternativo Turbina de gas Hidráulica Eólica Fotovoltaica Residuos |
| | Semi-maduras | Biomasa Micro turbina Pila de combustible |
| | Emergentes | Marina Geotérmica |
| Sistemas de almacenamiento | Maduras | Bombeo Batería |
| | Semi-maduras | Térmico Volante Aire a presión |
| | Emergentes | Hidrogeno SMES Ultra capacidades |

Fuente: Guía básica de la generación distribuida [10]

Ventajas:

- Reestructuración del sector eléctrico, que elimina la planificación centralizada y establece la libre competencia de la generación
- Saturación de la capacidad del actual sistema de potencia ante demandas fuertemente crecientes. Problemas de ubicación de las grandes centrales y ampliación de la infraestructura actual del sistema de potencia
- Reducción de pérdidas en la red y del costo asociado a las infraestructuras que la soportan
- Avances tecnológicos en el desarrollo de las fuentes alternativas de generación y reducción de costos
- Conservación de las fuentes de energía básicas: petróleo, carbón y gas natural
- Autonomía energética

- Reducción de las emisiones de gases de combustión derivada de los objetivos establecidos en el Protocolo de Kyoto. Potenciación de la utilización de fuentes de energía renovable.
- Requisitos de continuidad en el servicio
- Favorece el desarrollo de regiones aisladas y la inversión privada

Desventajas:

- Limitaciones tecnológicas ya que no todos los países cuentan con un desarrollo energético sustancial para la aplicación de la generación distribuida
- Para las tecnologías de GD renovables, su producción depende de la disponibilidad de dicho recurso, el cual tiene, generalmente, un comportamiento impredecible
- Problemas de distribución, ya que las redes no están preparadas técnicamente para la GD, pues fueron diseñadas para conectar cargas, no generadores
- La falta de madurez de algunas tecnologías, y la poca difusión que ello conlleva, hace que los costos de inversión inicial, así como el mantenimiento posterior sean muy elevados
- Las barreras regulatorias incluyen los problemas existentes a la hora de obtener las licencias de instalación (problemas medioambientales, sociales, etc), que involucran en muchos casos a autoridades locales, regionales y nacionales, los cuales hacen el proceso largo y tedioso [10]

2.2.2 Convertidor electrónico de potencia

Los inversores son convertidores electrónicos de potencia cuya función principal es producir una señal de salida de corriente alterna desde una fuente de energía de corriente directa. Estas son las formas de onda requeridas en controladores de velocidades

ajustables (ASDs), fuentes de energía ininterrumpidas (UPS), compensadores estáticos, filtros activos, sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS), y compensadores de voltaje, las cuales son solo unas pocas de sus aplicaciones [11]. El esquema básico de un convertidor electrónico se muestra en la Figura 2.1.

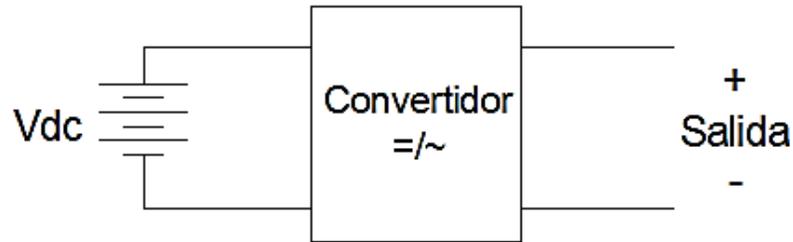


Figura 2.1 Esquema básico de un convertidor electrónico de potencia
Fuente: Carvajal y D'Andrea

2.2.2.1 Convertidores trifásicos

Los convertidores trifásicos se usan en aplicaciones de grandes potencias. Se pueden conectar tres puentes inversores monofásicos medios o completos, en paralelo, para formar la configuración de un inversor trifásico. Las señales de control de los inversores monofásicos se deben adelantar o atrasar 120 grados entre sí, para obtener voltajes (fundamentales) trifásicos balanceados [12].

La Figura 2.1 muestra el esquema básico de un convertidor trifásico de onda completa. La aplicación principal de este circuito es el control de la velocidad de los motores de inducción, donde se varía la frecuencia de salida. Los interruptores se abren y se cierran según la técnica de conmutación aplicada [13].

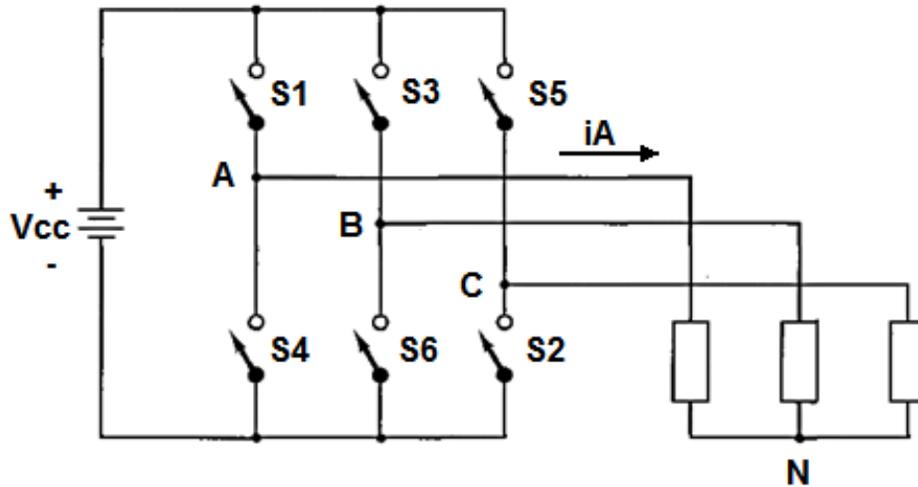


Figura 2.2 Esquema básico de un inversor trifásico de onda completa
Fuente: D. W. Hart [13]

En este sentido, se tiene un circuito con seis interruptores, donde S1, S3 y S5 son complementarios a S4, S6 y S2 respectivamente. De esta forma, las combinaciones de los diferentes estados de conmutación darán origen a los vectores de conmutación; los cuales se definen como las ocho posibles combinaciones de los interruptores que generan diferentes tensiones de fase y de línea. En la Figura 2.3 se muestran los estados de conmutación, donde V_{dc} es la tensión de la fuente de continua; V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} son las tensiones de línea alternas resultantes y U_0 a U_7 son los vectores de conmutación. Con esto, se tiene que:

$$V_{Sab} = (S_a - S_b) \cdot V_{dc} \quad 2.1$$

$$V_{Sbc} = (S_b - S_c) \cdot V_{dc} \quad 2.2$$

$$V_{Sca} = (S_c - S_a) \cdot V_{dc} \quad 2.3$$

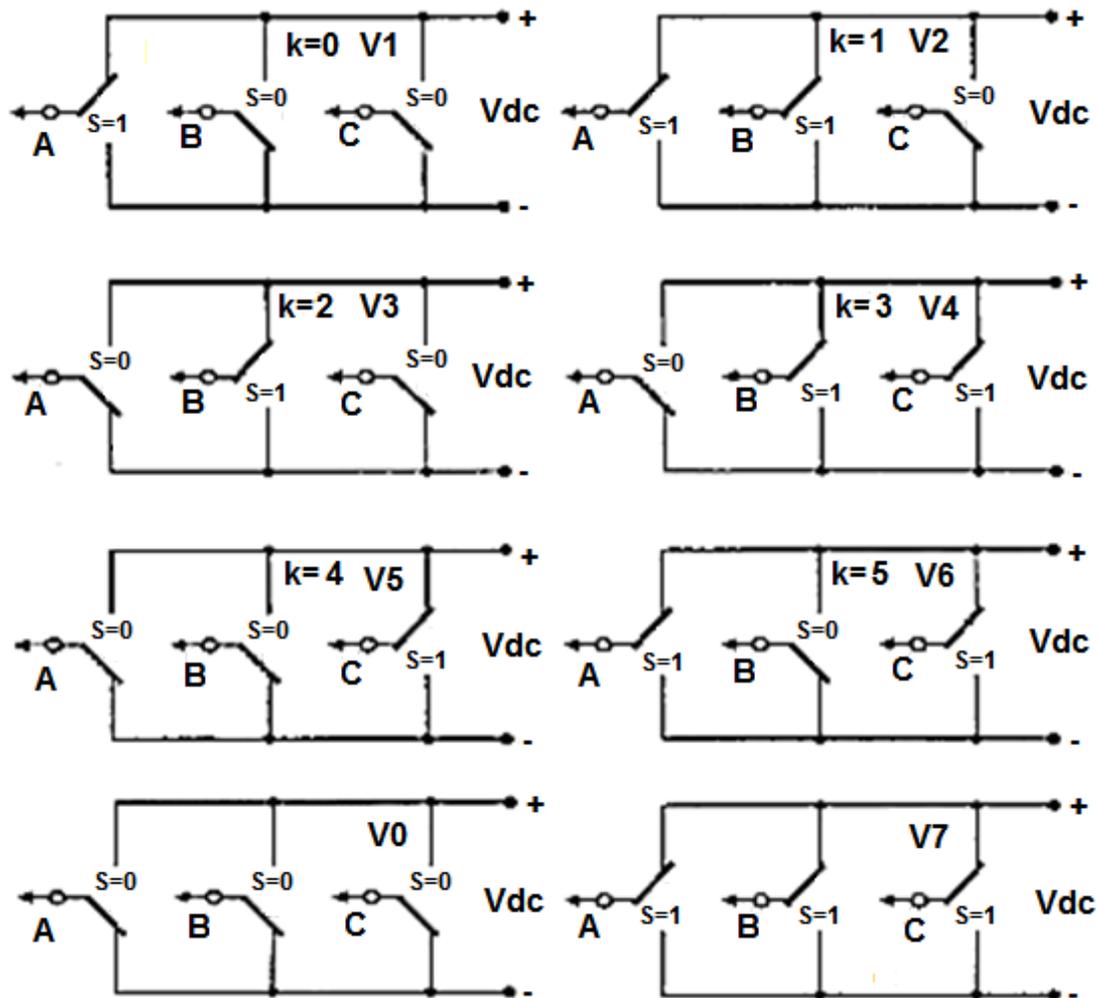


Figura 2.3 Estados de conmutación de un puente convertidor de dos niveles.
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

De esta manera, si se sustituye el estado cero y el estado siete de conmutación en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 se observa que las tensiones resultantes de línea serán cero, mientras que para el resto de los estados, las tensiones serán diferentes de cero. A estos vectores que nulifican las tensiones se les llama vectores nulos.

2.2.2.2 Definición matemática del convertidor electrónico de potencia

La relación básica entre los vectores de un convertidor se presenta en la Figura 2.4.

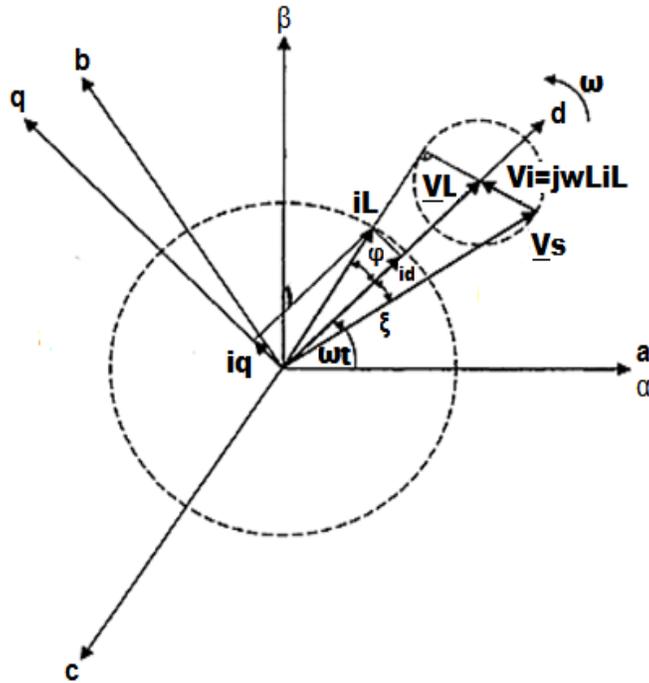


Figura 2.4 Relación entre los vectores de un convertidor electrónico de potencia
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

Los voltajes de línea trifásicos y la corriente de línea fundamental, son:

$$V_a = E_m \cos \omega t \quad 2.4$$

$$V_b = E_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad 2.5$$

$$V_c = E_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad 2.6$$

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \phi) \quad 2.7$$

$$i_b = I_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi \right) \quad 2.8$$

$$i_c = I_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi \right) \quad 2.9$$

Capítulo 2. Antecedentes y Marco Teórico.

Donde E_m , I_m y ω son las amplitudes del voltaje de fase, de la corriente y de la frecuencia angular, respectivamente, donde se asume que:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad 2.10$$

Si se transforman las ecuaciones 2.4 a la 2.9 al sistema coordenado $\alpha - \beta$ mediante el uso de la transformada de Clark (ver anexo A.1) los voltajes de entrada en el marco de referencia estacionario $\alpha - \beta$ son:

$$V_{L\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} * E_m \cos(\omega t) \quad 2.11$$

$$V_{L\beta} = \sqrt{\frac{3}{2}} * E_m \sin(\omega t) \quad 2.12$$

Al aplicar la transformada de Park (ver anexo A.2), se obtienen los voltajes de entrada en el sistema coordenado d-q, los cuales son:

$$\begin{bmatrix} V_{Ld} \\ V_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} * E_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{V_{L\alpha}^2 + V_{L\beta}^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.13$$

2.2.2.3 Descripción de un convertidor electrónico de potencia

Se presenta el modelo monofásico de un convertidor electrónico de potencia en la Figura 2.5, el cual servirá de base para estudiar al convertidor trifásico.

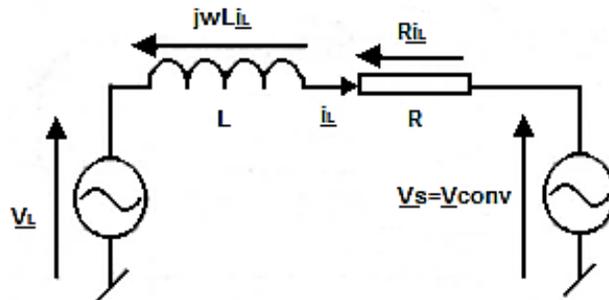


Figura 2.5 Equivalente monofásico de un convertidor electrónico de potencia
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14].

La ecuación resultante de dicho circuito, es:

$$V_L = Ri_L + \frac{di_L}{dt}L + V_{conv} \quad 2.14$$

El diagrama fasorial con factor de potencia unitario es el que se muestra en la Figura 2.6:

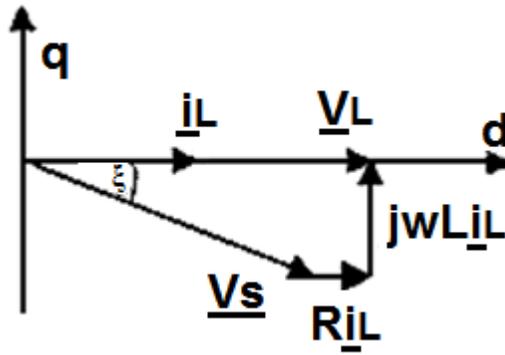


Figura 2.6 Diagrama fasorial con factor de potencia unitario
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

De igual manera, las ecuaciones para el modelo trifásico, son:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad 2.15$$

Al aplicar la transformada de Clark (ver anexo A.1) a la ecuación 2.15, se obtienen las ecuaciones de voltaje en un marco de referencia estacionario $\alpha - \beta$, las cuales son:

$$\begin{bmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} \quad 2.16$$

2.2.2.4 Modelo de un convertidor electrónico de potencia en un marco de referencia síncrono (d-q)

Al aplicar la transformada de Park (ver anexo A.2) a la ecuación 2.16, obtenemos:

$$V_{Ld} = Ri_{Ld} + \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + V_{Sd} \quad 2.17$$

$$V_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega Li_{Ld} + V_{Sq} \quad 2.18$$

R puede ser despreciada, debido a que la caída de tensión en la resistencia es significativamente menor que la caída de tensión en la inductancia, lo cual simplifica las ecuaciones 2.17 y 2.18:

$$V_L = \frac{di_L}{dt} L + V_{conv} \quad 2.19$$

Si se considera que el convertidor es trifásico:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad 2.20$$

Al aplicarle transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} \quad 2.21$$

Al aplicar transformada de Park y separando las componentes en d y q, se obtienen las ecuaciones 2.22 y 2.23:

$$V_{Ld} = \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + V_{sd} \quad 2.22$$

$$V_{Lq} = L \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega Li_{Ld} + V_{sq} \quad 2.23$$

La potencia activa y reactiva proporcionada por la fuente viene dada por:

$$P = Re \{ \bar{V} * \bar{i}^* \} = V_{\alpha} i_{\alpha} + V_{\beta} i_{\beta} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad 2.24$$

$$Q = Im \{ \bar{V} * \bar{i}^* \} = V_{\beta} i_{\alpha} - V_{\alpha} i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{bc} i_a + V_{ca} i_b + V_{ab} i_c) \quad 2.25$$

2.2.2.5 Cálculo del valor de la inductancia y de Vdc

Para una operación adecuada de un convertidor electrónico de potencia es necesario un valor de voltaje dc mínimo. Para realizar esto, partiremos de las ecuaciones 2.22 y 2.23 las cuales pueden ser transformadas a una forma fasorial en coordenadas síncronas d-q, definiendo la derivada de la corriente como:

$$L \frac{di_{Ldq}}{dt} = \underline{V}_{Ldq} - j\omega L \underline{i}_{Ldq} - \underline{V}_{sdq} \quad 2.26$$

La ecuación anterior define la dirección y tasa de movimiento del fasor de corriente. Los 6 fasores (V_1 -6) de voltaje de entrada al convertidor, giran en el sentido de las agujas del reloj en un sistema coordinado síncrono d-q. Para los fasores $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ y V_7 sus derivadas están expresadas, respectivamente, como $V_{p0}, V_{p1}, V_{p2}, V_{p3}, V_{p4}, V_{p5}, V_{p6}$ y V_{p7} (ver Figura 2.7 Posición instantánea de los fasores).

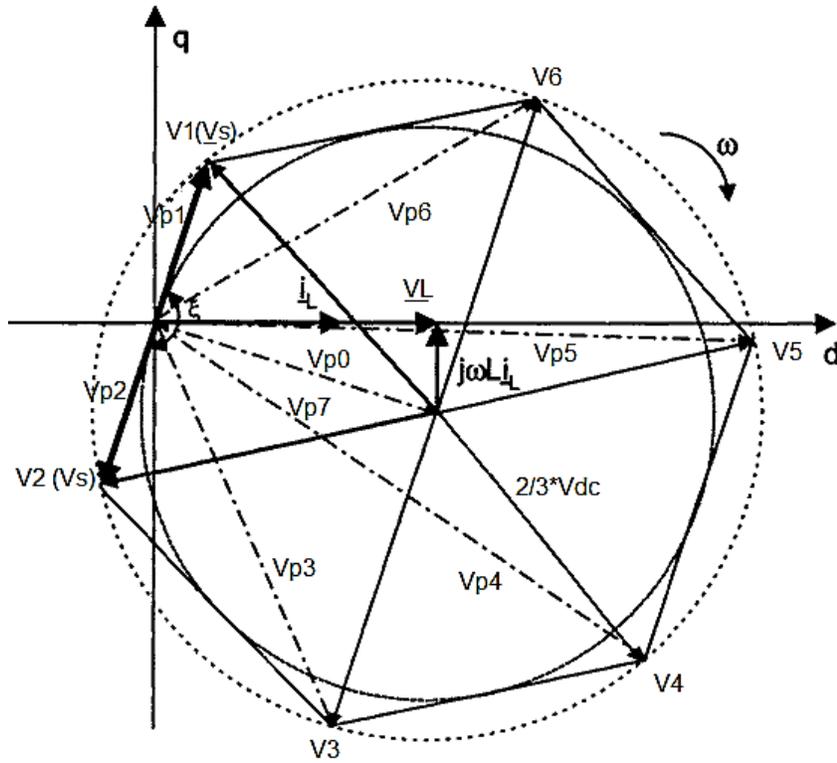


Figura 2.7 Posición instantánea de los fasores
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

Es posible realizar un control de corriente completo cuando la corriente se mantiene dentro del área especificada de error (ver Figura 2.8 Condición límite para la correcta operación de un convertidor).

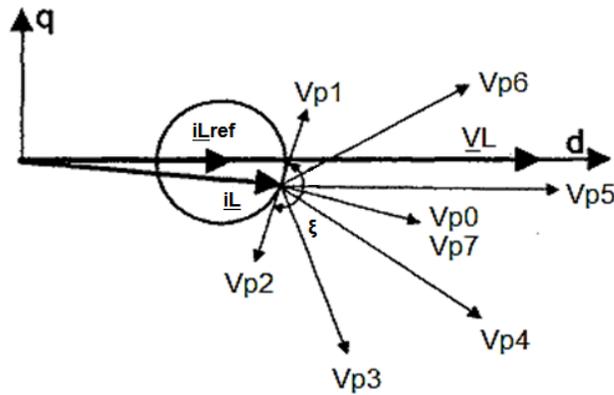


Figura 2.8 Condición límite para la correcta operación de un convertidor
Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

La Figura 2.7 y la Figura 2.8, demuestran que cualquier fasor, puede forzar el fasor de corriente dentro del área de error cuando el ángulo creado por los fasores V_{p1} y V_{p2} es $\xi \leq \pi$. Esto resulta de la condición trigonométrica en la cual los fasores V_{p1} , V_{p2} , V_1 y V_2 forman un triángulo equilátero $\xi = \pi$, donde $\underline{V}_{Ldq} - j\omega L \underline{i}_{Ldq}$ es la altura. Por lo tanto, y a partir de una sencilla relación trigonométrica, es posible definir las condiciones de frontera, tal que:

$$|\underline{V}_{Ldq} - j\omega L \underline{i}_{Ldq}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{V}_{sdq} \quad 2.27$$

Después de haber aplicado la transformada de Park (ver anexo A.2), y asumiendo que $\underline{V}_{sdq} = \frac{2}{3} V_{dc}$, que $\underline{V}_{Ldq} = E_m$ y que $\underline{i}_{Ldq} = i_{Ld}$ (para factor de potencia unitario), obtenemos la condición de voltaje DC mínimo:

$$V_{dc} > \sqrt{3[E_m^2 + (\omega L i_{Ld})^2]} ; \text{ con } \xi > \pi \quad 2.28$$

La ecuación 2.28 muestra la relación entre la fuente de voltaje (que es usualmente constante), el voltaje de la fuente DC, la corriente y la inductancia. Esto también significa que la suma del fasor $\underline{V}_{Ldq} - j\omega L \underline{i}_{Ldq}$ no debería exceder la región lineal de modulación, por ejemplo, el círculo formado en el hexágono (ver Figura 2.7 Posición instantánea de los fasores).

Después de despejar de la ecuación 2.28, el valor máximo de inductancia puede ser calculado como:

$$L < \frac{\sqrt{\frac{V_{dc}^2}{3} - E_m^2}}{\omega i_{Ld}} \quad 2.29$$

2.2.3 Métodos de control de inyección de potencia mediante convertidores electrónicos.

Los convertidores electrónicos de potencia deben ser apropiadamente controlados para entregar los voltajes, corrientes, o rangos de frecuencia que necesite la carga y para garantizar sus requerimientos dinámicos.

2.2.3.1 Marco de referencia síncrono (SRF)

El control orientado al voltaje (VOC, por sus siglas en inglés) de un convertidor electrónico de potencia conectado a la línea está basado en la transformación de coordenadas entre un sistema de referencia estacionario y un sistema de referencia d-q rotatorio síncrono.

Diagrama de bloques del control orientado al voltaje (VOC)

Los sistemas de control convencionales usan control de corriente en lazo cerrado en un marco de referencia rotatorio, el esquema del control orientado al voltaje se muestra en la Figura 2.9.

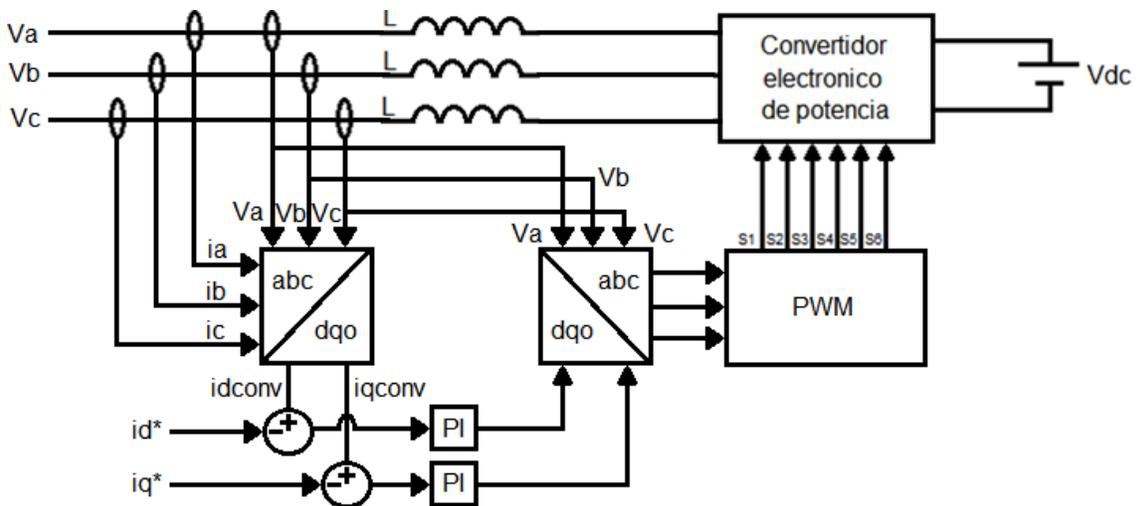


Figura 2.9 Diagrama de bloques del control orientado al voltaje
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Una característica resaltante para este controlador de corriente es el procesamiento de 2 señales en 2 sistemas coordenados. El primero es el sistema estacionario o fijo α - β y el segundo es el sistema coordenado d-q rotatorio síncrono. Los valores trifásicos medidos son transformados a un equivalente del sistema de 2 fases α - β para luego ser transformados nuevamente al sistema coordenado rotatorio en un bloque α - β /d-q (ver anexo A.2 Transformación de Park):

$$\begin{bmatrix} k_d \\ k_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{VL} & \sin \gamma_{VL} \\ -\sin \gamma_{VL} & \cos \gamma_{VL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_\alpha \\ k_\beta \end{bmatrix} \quad 2.30$$

Gracias a este tipo de transformación, los valores de control son señales DC. Se puede realizar una transformación inversa d-q/ α - β en la salida del sistema de control, y esto proporciona al rectificador las señales de referencia en coordenadas estacionarias:

$$\begin{bmatrix} k_\alpha \\ k_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{VL} & -\sin \gamma_{VL} \\ \sin \gamma_{VL} & \cos \gamma_{VL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_d \\ k_q \end{bmatrix} \quad 2.31$$

Para ambas transformaciones de coordenadas el ángulo del vector de voltaje γ_{VL} está definido como:

$$\sin \gamma_{VL} = \frac{V_{L\beta}}{\sqrt{(V_{L\alpha})^2 + (V_{L\beta})^2}} \quad 2.32$$

$$\cos \gamma_{VL} = \frac{V_{L\alpha}}{\sqrt{(V_{L\alpha})^2 + (V_{L\beta})^2}} \quad 2.33$$

En coordenadas d-q orientadas al voltaje, el vector de corriente de línea AC i_L es separada en 2 componentes rectangulares, de modo que $i_L = [i_{Ld} \quad i_{Lq}]$, como se muestra en la Figura 2.10.

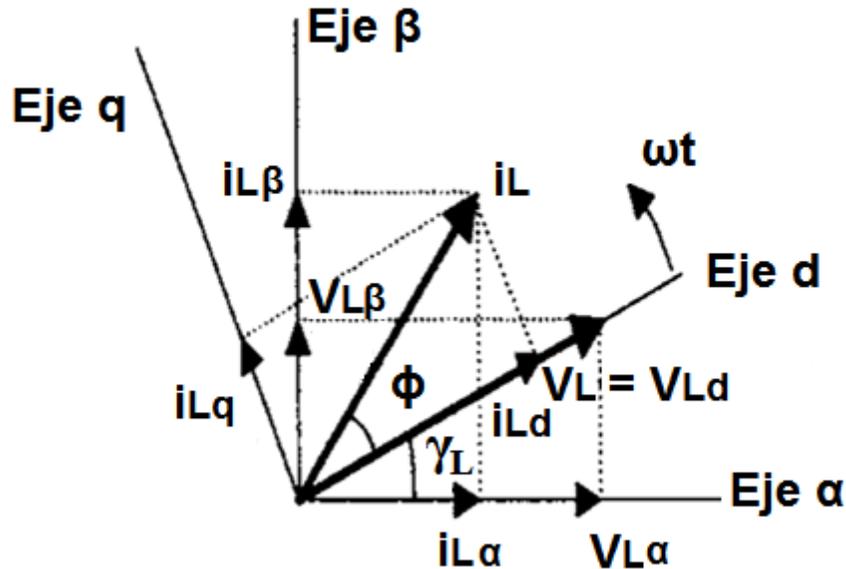


Figura 2.10 Diagrama fasorial del VOC. Transformación de coordenadas de corriente, línea y voltaje del convertidor desde el sistema coordenado estacionario α - β al sistema coordenado rotatorio d - q .

Fuente: M. Malinowski y M. Kasmierkowski [14]

La componente i_{Lq} determina la potencia reactiva, mientras que i_{Ld} determina el flujo de potencia activa. Por ende, las potencias activa y reactiva pueden ser controladas de manera independiente. La condición de factor de potencia unitario (UPF) es alcanzada cuando el fasor de corriente de línea, i_L , está en fase con el voltaje de línea, V_L . Al colocar el eje d del sistema coordenado rotatorio sobre el fasor del voltaje de línea, se puede obtener un modelo dinámico simplificado.

2.2.3.2 Control Directo de Potencia (DPC)

El objetivo de este método es controlar directamente las potencias activa y reactiva que intercambian el convertidor y la red, de la misma forma en que se hace con el par y el flujo en máquinas eléctricas. Como controladores, se usan comparadores con bandas de histéresis para los errores en las potencias activa y reactiva, ΔP y ΔQ , respectivamente. Las salidas de estos comparadores junto con la posición del fasor de tensión de la red son las entradas a una tabla de conmutación óptima, cuya salida es uno de los vectores de

tensión del convertidor. El diagrama de bloques del control directo de potencia se presenta en la Figura 2.11.

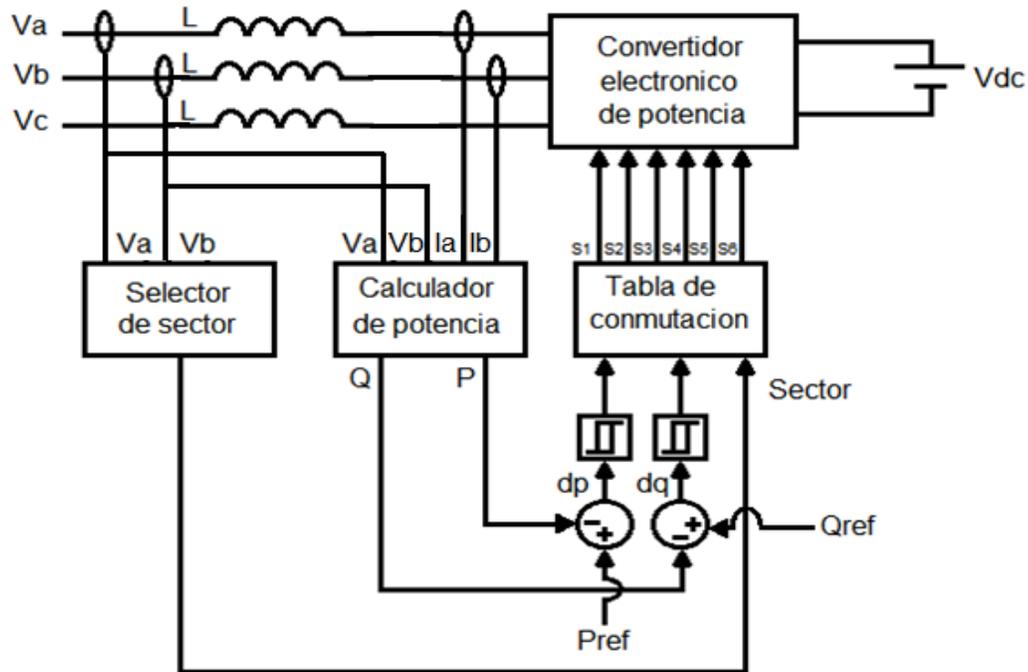


Figura 2.11 Diagrama de bloques del control directo de potencia
Fuente: Carvajal y D'Andrea

a) Fundamentos del control directo de potencia

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo del DPC es controlar directamente las potencias activa y reactiva. Para ello, se ha de diseñar una tabla óptima de conmutación, que, a partir de las salidas de los comparadores de histéresis de P y Q, devuelva el vector de tensión del convertidor que produzca los cambios deseados en las potencias.

Como se presentó anteriormente en la sección 2.2.2.1, un convertidor trifásico de 2 niveles de tensión tiene 8 estados de conmutación, 6 activos y 2 nulos, como se muestra en la Figura 2.12, en la que también se puede apreciar la división del plano en 6 sectores, centrados en los propios vectores de tensión del convertidor. Esta división facilitará el diseño de la tabla óptima de conmutación.

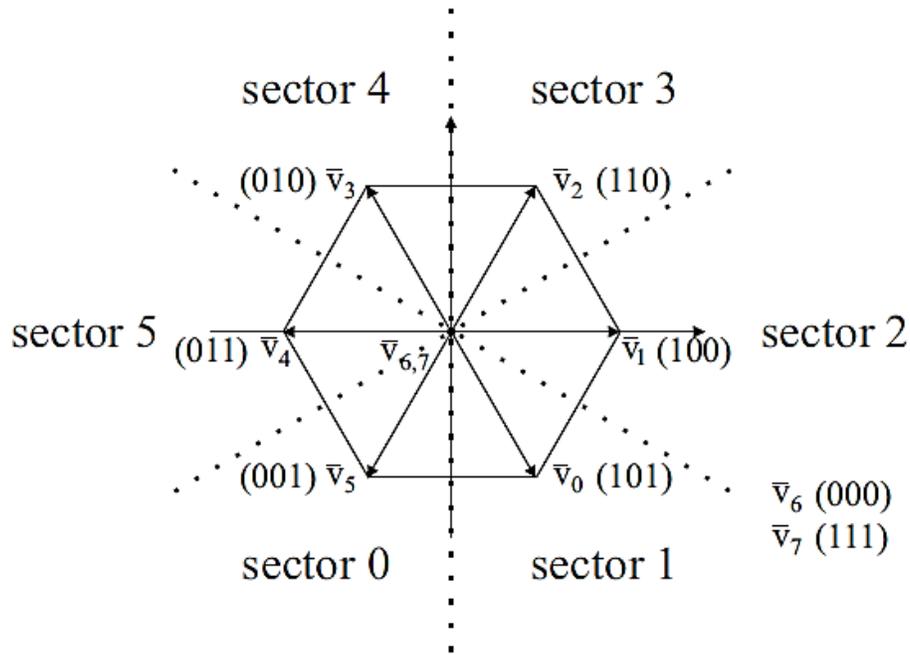


Figura 2.12 Vectores de tensión de un convertidor de 2 niveles

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

b) Formulación basada en tensiones

Las expresiones de las potencias activa y reactiva en magnitudes por unidad son:

$$P = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q \quad 2.34$$

$$Q = V_q \cdot i_d - V_d \cdot i_q \quad 2.35$$

Se debe seleccionar el vector adecuado, que incremente P o Q en concordancia con los requerimientos del sistema, los cuales son determinados al comparar la potencia calculada con la referencia. Los vectores y los cambios que producen aparecen en la Tabla 2.2, donde k representa al sector en que se encuentra el vector de tensión del convertidor (ver sección 2.2.3.2c) DPC aplicado a convertidores de dos niveles).

Tabla 2.2 Vectores de tensión del convertidor que cumplen los requisitos de control de potencia

| ΔP | ΔQ | Vector de tensión del convertidor | | | |
|------------|------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 1 | $\bar{V}_{f(k)}$ | | | |
| 1 | 0 | $\bar{V}_{f(k+1)}$ | | | |
| 0 | 1 | $\bar{V}_{f(k-1)}$ | $\bar{V}_{f(k-1)}$ | $\bar{V}_{f(k-2)}$ | $\bar{V}_{f(k-2)}$ |
| 0 | 0 | $\bar{V}_{f(k+2)}$ | $\bar{V}_{f(k+3)}$ | $\bar{V}_{f(k+2)}$ | $\bar{V}_{f(k+3)}$ |

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

En la Tabla 2.3, se muestran los vectores óptimos de todos los posibles mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.3 Tabla de conmutación óptima para DPC de convertidores de 2 niveles

| ΔP | ΔQ | Vector de tensión del convertidor |
|------------|------------|-----------------------------------|
| 1 | 1 | $\bar{V}_{f(k)}$ |
| 1 | 0 | $\bar{V}_{f(k+1)}$ |
| 0 | 1 | $\bar{V}_{f(k-2)}$ |
| 0 | 0 | $\bar{V}_{f(k+2)}$ |

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

Al expresar la ecuación 2.34 en un sistema de referencia ligado al fasor de la tensión de la red, esto es $v_q = 0$, se observa que P y Q son proporcionales a las componentes directas i_d y de cuadratura i_q del fasor de intensidad, respectivamente:

$$P = V_d \cdot i_d \quad 2.36$$

$$Q = -V_d \cdot i_q \quad 2.37$$

Por tanto, para producir un cambio en la potencia, basta con modificar dichas componentes de intensidad. Para comprender esto mejor se presenta el siguiente circuito equivalente de un convertidor conectado a la red a través de un filtro inductivo. Su diagrama fasorial es el mostrado en la Figura 2.13.

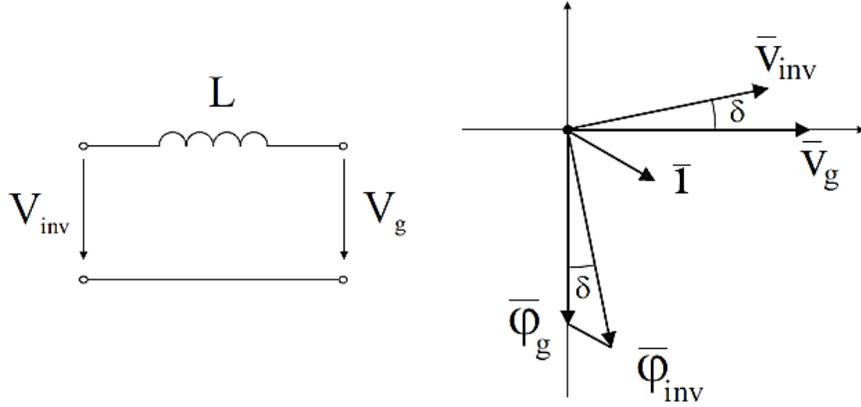


Figura 2.13 Circuito equivalente y diagrama fasorial de un convertidor conectado a la red

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

Al realizar el recorrido de la malla de la Figura 2.13, se obtiene la ecuación 2.38.

$$V_{inv} = L \cdot \frac{di}{dt} + V_g \quad 2.38$$

Al expresar V_{inv} como una función del estado de conmutación del convertidor en la ecuación 2.38, el incremento de intensidad en un tiempo de ciclo T_s , resulta:

$$\Delta i \approx \frac{1}{L} \int_0^{T_s} (\bar{V}_{inv}(S_a, S_b, S_c) - \bar{V}_g) dt \quad 2.39$$

Suponiendo que la diferencia entre los 2 vectores de tensión de la red y del convertidor es constante durante T_s , la ecuación 2.39 se puede expresar como:

$$\Delta i \approx \frac{T_s}{L} (\bar{V}_{inv}(S_a, S_b, S_c) - \bar{V}_g) = \frac{T_s}{L} \Delta \bar{V} \quad 2.40$$

De la ecuación anterior se deduce que el vector variación de intensidad $\Delta \vec{i}$ es colineal con el vector variación de tensión $\Delta \vec{V}$. Sus proyecciones sobre el vector tensión de la red \vec{V}_g , determinaran las componentes d y q de los incrementos de intensidad, que a su vez serán proporcionales a los cambios en las potencias activa y reactiva respectivamente. Calculando los términos de variación de potencia entre 2 instantes consecutivos, $[n]$ y $[n + 1]$, a partir de la ecuación 2.36, se tiene:

$$\Delta P = P[n + 1] - P[n] = V_d[n + 1] \cdot i_d[n + 1] - V_n[n] \cdot i_d[n] \quad 2.41$$

$$\Delta Q = Q[n + 1] - Q[n] = -V_d[n + 1] \cdot i_q[n + 1] - (-V_n[n] \cdot i_d[n]) \quad 2.42$$

Considerando que la tensión se mantiene constante e igual a su valor nominal (lo que ocurre siempre que la red no sufra perturbaciones), esto es, considerando $v_d[n + 1] = v_d[n] = v_d = 1 pu$, resulta:

$$\Delta P = i_d[n + 1] - i_d[n] = \Delta i_d \quad 2.43$$

$$\Delta Q = -(i_q[n + 1] - i_q[n]) = -\Delta i_q \quad 2.44$$

En la Figura 2.14 se presentan los sectores para la formulación basada en tensiones.

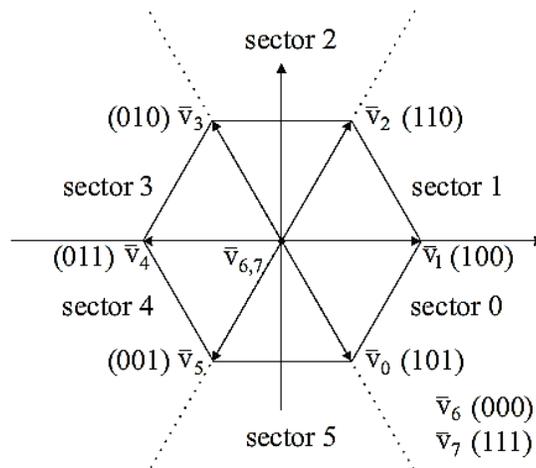


Figura 2.14 Sectores para la formulación basada en tensiones
Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

El signo de estos incrementos depende de la posición relativa de los vectores \bar{V}_g y \bar{V}_{inv} . Para ello, se divide el plano $\alpha - \beta$ en 6 sectores. En este caso, los sectores son los que se muestran en la Figura 2.14. Esta división es una rotación de 90 grados respecto a la división de la Figura 2.12, ya que ahora la referencia es \bar{V}_g , que adelanta 90 grados al flujo $\bar{\varphi}_g$. Así, los sectores están delimitados por los propios vectores de tensión del convertidor. Dadas unas consignas de variación de P y Q , resultantes de los reguladores de histéresis, se deberá determinar el vector de tensión del convertidor que habrá que aplicar para obtener dichos cambios. Mediante el análisis de las proyecciones de $\Delta\bar{V}$ sobre el vector de tensión de la red, se puede determinar si las variaciones de las componentes directa y de cuadratura de $\Delta\bar{i}$, Δi_d y Δi_q , implican un aumento o una disminución de P y Q . En la Tabla 2.4 se muestra la influencia sobre los cambios en P y Q de la aplicación de cada uno de los vectores de tensión del convertidor, en función del sector en el que se encuentre \bar{V}_g , con el valor de k comprendido entre 0 (cero) y cinco. El signo positivo (+) representa un incremento en la potencia, el signo negativo (-) un decremento y el 0 (cero) que no hay modificación.

Tabla 2.4 Signo de los cambios en P y Q en función del vector de tensión del convertidor aplicado y del sector k.

| | $\bar{V}_{f(k-2)}$ | $\bar{V}_{f(k-1)}$ | $\bar{V}_{f(k)}$ | $\bar{V}_{f(k+1)}$ | $\bar{V}_{f(k+2)}$ | $\bar{V}_{f(k+3)}$ | $\bar{V}_0 \bar{V}_7$ |
|------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| ΔP | - | - | + | + | - | - | - |
| ΔQ | + | + | + | - | - | - | 0 |

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

Los vectores nulos (\bar{V}_0 y \bar{V}_7) no se aplican puesto que no implican cambio alguno en la potencia reactiva y un decremento de la potencia activa se puede conseguir mediante otros vectores. Además, su inclusión supondría el uso de un comparador de 3 niveles para el regulador de potencia reactiva, además de poder dar lugar a situaciones en las que no se cumplirían los requisitos de control, como sería el caso de $\Delta P = 1$ y $\Delta Q = 0$ (incremento de la potencia activa y que la reactiva no se modificase). Nuevamente,

analizando las distintas posibilidades en todos los sectores se obtiene la tabla de conmutación óptima (Tabla 2.5) [15].

Tabla 2.5 Tabla de conmutación óptima para DPC de convertidores de 2 niveles

| ΔP | ΔQ | Vector de tensión del convertidor |
|------------|------------|-----------------------------------|
| 1 | 1 | $\bar{V}_{f(k)}$ |
| 1 | 0 | $\bar{V}_{f(k+1)}$ |
| 0 | 1 | $\bar{V}_{f(k-2)}$ |
| 0 | 0 | $\bar{V}_{f(k+2)}$ |

Fuente: J. Eloy-García Carrasco [15]

c) DPC aplicado a convertidores de dos niveles

Una vez obtenida la tabla de conmutación óptima, el Control Directo de Potencia se puede aplicar a convertidores con dos niveles de tensión. Para ello se deben calcular el sector k y las potencias. El cálculo del sector se hace a partir de las componentes $(\alpha - \beta)$ de las tensiones de la red. Para calcularlas, se miden las tensiones compuestas V_{ab} y V_{ca} . Se puede comprobar que la relación entre las tensiones simples y compuestas es:

$$V_a = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{ca}) \quad 2.45$$

$$V_b = -\frac{1}{3}(2V_{ab} + V_{ca}) \quad 2.46$$

Al aplicarle la transformada de Clark (ver anexo A.1) a los voltajes de fase de la red, ecuaciones 2.4 a 2.9, se puede deducir que:

$$V_\alpha = \frac{3}{2}V_a \quad 2.47$$

$$V_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(V_a + 2V_b) \quad 2.48$$

Capítulo 2. Antecedentes y Marco Teórico.

Las cuales, a su vez, se pueden expresar en función de las tensiones compuestas medidas.

$$V_{\alpha} = \frac{1}{2}(V_{ab} - V_{ca}) \quad 2.49$$

$$V_{\beta} = -\frac{\sqrt{3}}{2}(V_{ab} + V_{ca}) \quad 2.50$$

Con V_{α} y V_{β} se calcula el ángulo del vector de tensión:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}}\right) \quad 2.51$$

A partir de θ , el cálculo del sector resulta de la función:

$$k = \begin{cases} 0 & \text{si } -\frac{\pi}{3} < \theta \leq 0 \\ 1 & \text{si } 0 < \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 2 & \text{si } \frac{\pi}{3} < \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 3 & \text{si } \frac{2\pi}{3} < \theta \leq \pi \\ 4 & \text{si } \pi < \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 5 & \text{si } \frac{4\pi}{3} < \theta \leq \frac{5\pi}{3} \end{cases} \quad 2.52$$

En este caso, k representa los sectores de la formulación en tensiones.

Por último, transformando las medidas de corriente a ejes $(\alpha - \beta)$ según:

$$i_{\alpha} = \frac{3}{2}i_a \quad 2.53$$

$$i_{\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2}(i_a + 2i_b) \quad 2.54$$

Se obtienen las potencias:

$$P = \frac{2}{3}(V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta}) \quad 2.55$$

$$Q = \frac{2}{3}(V_{\beta}i_{\alpha} - V_{\alpha}i_{\beta}) \quad 2.56$$

2.2.4 Transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor

MOSFET (Transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor, por sus siglas en inglés), es un dispositivo controlado por tensión con las características mostradas en la figura 2.15. Los MOSFET de potencia son fundamentalmente de acumulación más que de agotamiento. Una tensión puerta-fuente lo suficientemente grande activará el dispositivo, dando lugar a una pequeña tensión drenador-fuente. El circuito de excitación para activar y desactivar un MOSFET es normalmente más sencillo que el utilizado para un BJT (transistor de unión bipolar). En el estado de conducción, las variaciones de V_{DS} son linealmente proporcionales a las variaciones de i_D . Por tanto, el MOSFET en estado de conducción puede modelarse como una resistencia de conducción, denominada $R_{DS} (On)$. Los MOSFET de baja tensión tienen resistencias de conducción menores que $0,1 \Omega$, mientras que los MOSFET de alta tensión tienen resistencias de conducción de unos cuantos ohmios.

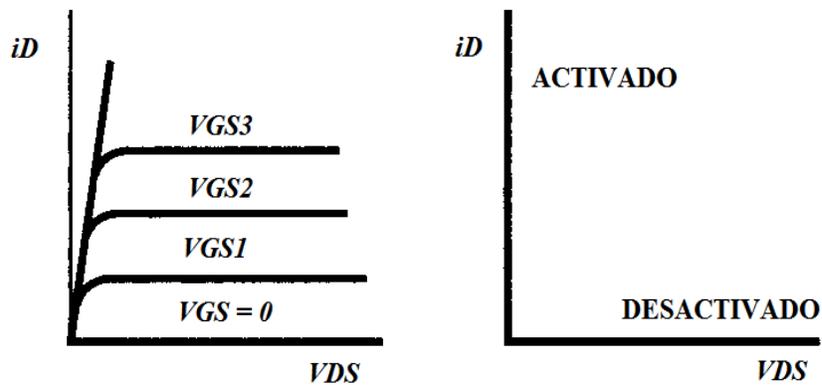


Figura 2.15 (a) Característica del MOSFET (b) Característica ideal del MOSFET
Fuente: D. W. Hart [13]

La construcción de los MOSFET produce un diodo (de cuerpo) parásito, como se muestra en la Figura 2.16, lo que se puede utilizar a veces de forma ventajosa en circuitos electrónicos de potencia. Los valores nominales llegan a alcanzar hasta 1000 V y 50 A. Las velocidades de conmutación del MOSFET son mayores que las del BJT y se utilizan en convertidores que operan por encima de 100 kHz.

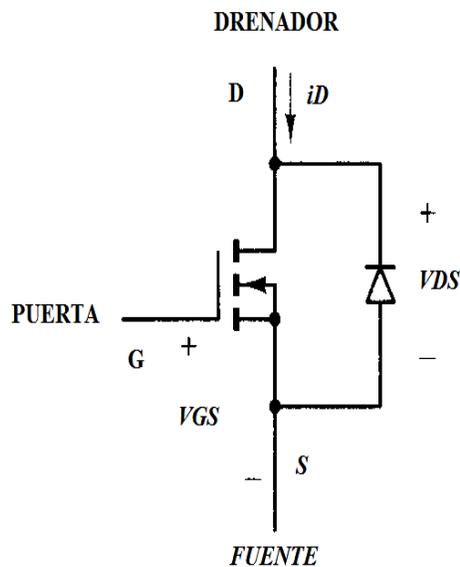


Figura 2.16 MOSFET (de canal n) con diodo parásito en anti paralelo
Fuente: D. W. Hart [13]

Las velocidades de conmutación y las pérdidas de potencia asociadas son dos factores muy importantes en los circuitos electrónicos de potencia. El MOSFET es un dispositivo de portadores mayoritarios que no sufre retrasos de almacenamiento de portadores minoritarios, lo que supone una ventaja en cuanto a velocidades de conmutación, por tanto, generalmente el MOSFET tiene menores pérdidas de conmutación.

Capítulo 3

Marco Metodológico

3.1 Tipo de investigación

Se estudiaron investigaciones realizadas referentes al tema de inyección de energía mediante convertidores electrónicos de potencia. Con la información recolectada se diseñó, construyó y ensayó el funcionamiento de un equipo de inyección para propósitos de aplicación a las industrias venezolanas, proponiendo así una solución a las problemáticas planteadas anteriormente. Según el objeto de estudio, el tipo de investigación realizado coincide con la investigación aplicada, la cual se centra en mejorar la condición humana mediante el aporte de soluciones a problemas actuales, que afectan a la sociedad, basándose en investigaciones previas que aporten los conocimientos necesarios para resolver el problema [16].

3.2 Metodología utilizada

Se compiló información de libros, papers, trabajos de grado, tesis, revistas científicas y bases de datos referentes a los fundamentos teóricos sobre los diferentes métodos de

control de inyección de energía mediante convertidores electrónicos de potencia conectados a la red.

Se sintetizó la información recopilada y se procedió a estudiarla para comprender los distintos esquemas y funcionamientos de los métodos de control de inyección de energía mediante convertidores electrónicos.

3.2.1 Simulación de los métodos de control

Se seleccionaron los esquemas de inyección de energía que más se adecuaron a los objetivos propuestos en este trabajo especial de grado, para que de esta manera, dichos esquemas fuesen simulados mediante la herramienta de simulación Simulink del software MATLAB. Se compararon los métodos simulados, analizando las ventajas y desventajas de cada uno y como las mismas afectan a la aplicación pensada para el equipo de inyección de energía. Los resultados obtenidos de estas simulaciones se encuentran en el capítulo 4.

3.2.2 Diseño del equipo de inyección de energía

Para la ejecución del proyecto y cumplimiento de los objetivos planteados se desarrolló un sistema experimental basado en el esquema de la Figura 3.1:

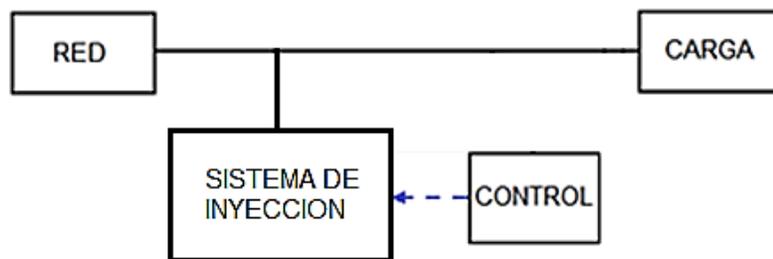


Figura 3.1 Esquema básico de inyección de energía
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En el sistema, la red constituye el sistema eléctrico trifásico, la carga determina el consumo de potencia, el equipo de inyección es el hardware y el control se basa en la aplicación de estrategias para controlar la energía en el sistema.

3.2.2.1 Red eléctrica

Se ha hecho imperativo implementar la inyección de energía a un sistema eléctrico de potencia lo más independiente posible de la red eléctrica nacional, en este sentido, se diseñó un esquema que contiene tres etapas, a manera de trabajar con un sistema de potencia que se pudiese controlar desde el laboratorio y se pudiese ensayar sin requerir permisos externos ni obedecer a normativas referentes a los ensayos que se desearan realizar.

El esquema de potencia consta de una primera etapa con alimentación monofásica alterna y salida de voltaje DC; una segunda etapa, que incluye a una máquina eléctrica DC alimentada por la etapa anterior; y finalmente, una etapa generadora, que incluye una máquina síncrona para generar tensiones alternas a partir del movimiento de la máquina DC de la segunda etapa, tal como se muestra en la Figura 3.2. El montaje del esquema de potencia se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.2 Esquema de potencia
Fuente: Carvajal y D'Andrea



Figura 3.3 Montaje del sistema de potencia.
Fuente: Carvajal y D'Andrea

a. Primera etapa:

Se alimentó a un autotransformador monofásico desde la red de corriente alterna del laboratorio, cuya salida alimenta a un rectificador de onda completa de diodos para obtener una salida de voltaje continuo, que, a su vez, tendrá un condensador en paralelo para reducir el rizo del voltaje, tal como se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Esquema de la primera etapa de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

b. Segunda etapa:

Se dispuso de tres reóstatos conectados en paralelo a la fuente DC resultante de la primera etapa, de aquí, se alimentó la excitación de la máquina DC y su armadura, al mismo tiempo que la excitación de la máquina síncrona encontrada en la tercera etapa.

De la segunda etapa, se obtiene el movimiento de eje requerido para hacer girar el rotor de la máquina síncrona de la etapa 3. Aquí, se tiene el control sobre las tensiones a suministrar a las diferentes excitaciones y a la armadura de la máquina DC, lo que quiere decir, que se pudo controlar la velocidad del motor, y con ello, la frecuencia de la tensión obtenida de la máquina síncrona, tal como se muestra en la Figura 3.5:

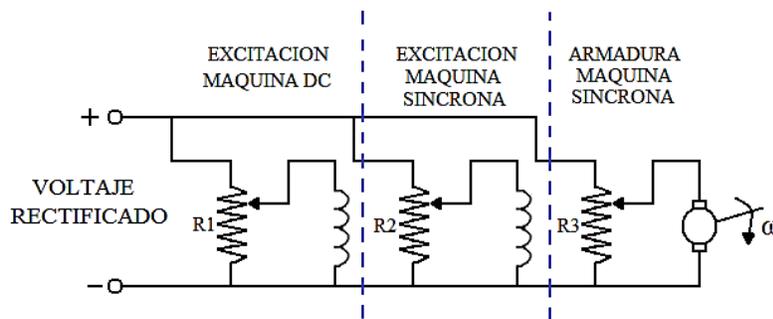


Figura 3.5 Esquema de la segunda etapa de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

c. Tercera etapa

En esta etapa, se encuentran la máquina síncrona, que se encarga de suministrar las tensiones trifásicas requeridas para los ensayos y un autotransformador trifásico conectado a su salida, para tener control sobre la amplitud de estas tensiones, tal como se muestra en la Figura 3.6.

En la Figura 3.7 se muestra un acercamiento del autotransformador mostrado la Figura 3.3 del montaje del esquema de potencia.

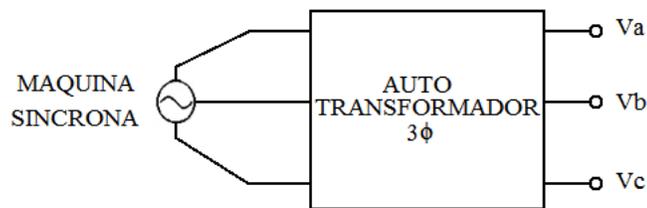


Figura 3.6 Esquema de la tercera etapa de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea



Figura 3.7 Autotransformador trifásico del esquema de potencia.
Fuente: Carvajal y D'Andrea

3.2.2.2 Carga

La carga que se seleccionó es del tipo RL, ya que el sistema está pensado para las industrias, y, en su mayoría, las cargas industriales son motores, que se pueden modelar como cargas de este tipo.

En este sentido, se utilizaron bobinas disponibles en el laboratorio de 2,5 ohmios de resistencia y 0,011 henrios de inductancia, en un arreglo Y paralelo para obtener 1,25

ohmios de resistencia y 0,00055 henrios de inductancia, tal como se muestra en la Figura 3.8.

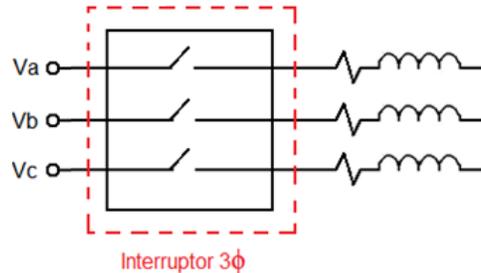


Figura 3.8 Esquema de la carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

3.2.2.3 Sistema de inyección

El módulo de inyección se compuso de los siguientes elementos indicados en la Figura 3.9, en la cual se puede apreciar que se tiene a la red conectada en paralelo con la carga y con el sistema de inyección de energía. En línea continua, se representa a la línea de potencia, mientras que con la línea punteada, se representan las líneas de control.

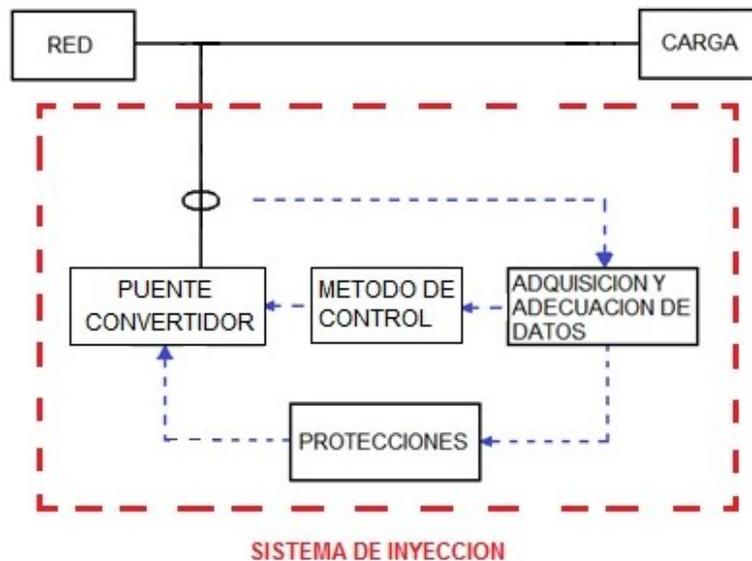


Figura 3.9 Esquema de inyección de energía mediante convertidores electrónicos de potencia

Se observa que se requiere medir corrientes y voltajes, que deben ser recibidos por un bloque de adquisición y adecuación de datos para que dicha información pueda ser recibida y procesada por el bloque de control. A su vez, existe un bloque de protección, que también recibe la información del bloque anterior y se encarga de deshabilitar el bloque de control en el caso de que se detecte alguna falla del sistema.

a) Método de control

En el bloque denominado “control”, se encuentra el esquema de control utilizado, del cual salen los pulsos u órdenes que debe seguir el convertidor electrónico de potencia para cumplir con su función.

En la Figura 3.10 se presenta el esquema de control DPC utilizado, y en la Figura 3.11 se muestra el montaje de todo el esquema de control y del circuito de disparo.

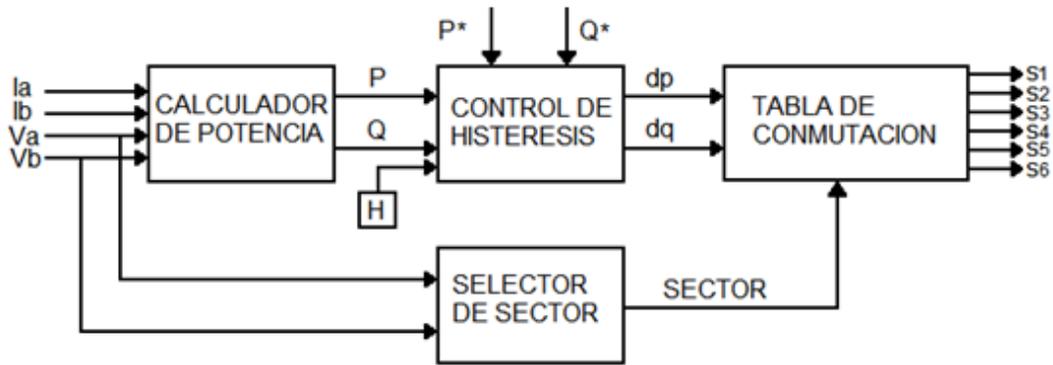


Figura 3.10 Esquema de control DPC utilizado

b) Selección y programación del microcontrolador

Para ejecutar el control, se requiere un microcontrolador con la capacidad de procesar cuatro señales de entrada (dos tensiones de la red y dos corrientes del equipo de inyección) para el control y que permita como mínimo tener seis salidas digitales, también se buscaba que el microcontrolador fuese capaz de proveer las frecuencias de conmutación requeridas a sus salidas por el método de control y que constase de memoria suficiente para la programación, de manera que los requerimientos mínimos de selección del microcontrolador son la disponibilidad de al menos cuatro convertidores analógicos

Capítulo 3. Marco Metodológico.

digitales y seis salidas digitales con la combinación de otro sistema dedicado a almacenamiento de datos.

Se seleccionó entonces el microcontrolador C2000 Launchpad F28027 de Texas Instrument, el cual posee 13 convertidores analógico-digitales, 18 entradas/salidas, 64K de memoria Flash y 12K de RAM y que además viene integrado en una plataforma de la misma compañía y permitió ser programado desde el ambiente de simulación, teniéndose un microcontrolador para el control del sistema y otro para almacenamiento de datos.



Figura 3.11 Montaje del esquema de control y circuito de disparo.
Fuente: Carvajal y D'Andrea

c) Equipo de inyección

Los sistemas de inyección obtienen la energía de fuentes renovables o de sistemas de almacenamiento. Para este trabajo especial de grado, la tensión del bus DC se suministró desde baterías de níquel-cadmio de seis celdas de 1.15 V cada una, que se encontraban disponibles en el laboratorio.

Una baja inductancia proporcionaría un alto rizo de corriente y esto haría al diseño más dependiente de la impedancia de línea. Un valor elevado de inductancia proporciona un bajo rizo de corriente, pero simultáneamente reducirá los límites de operación del convertidor. La caída de voltaje que ocurre en la inductancia controla la corriente. Esta caída de voltaje es controlada por el voltaje del convertidor, pero su valor máximo está limitado por el voltaje DC. Consecuentemente, una circulación de corriente elevada (potencia elevada) a través de la inductancia requiere, bien sea un voltaje DC elevado o

un valor de inductancia reducido (impedancia baja) [14]. Con esto, y partiendo de lo descrito anteriormente, se empleó de los inductores disponibles a inductores de 0,011 H y de 2,5 Ω de resistencia, los cuales eran los que permitían mayor paso de corriente. El esquema del equipo de inyección de energía es el presentado en la Figura 3.12:

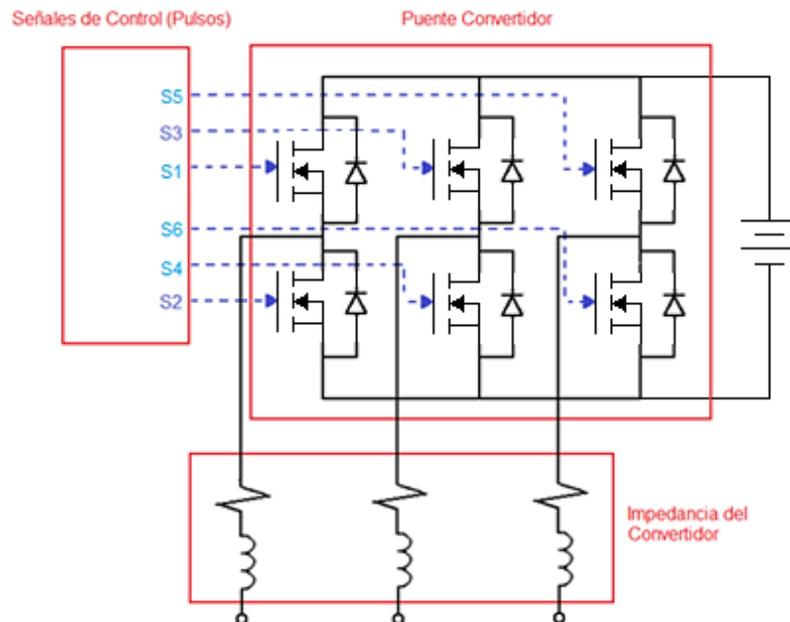


Figura 3.12 Esquema del equipo de inyección de energía
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Normalmente, el comportamiento de los circuitos electrónicos de potencia no se ve afectado de forma particular por el dispositivo real que se utilice para la conmutación, especialmente si las caídas de tensión en bornes del interruptor en estado de conducción son pequeñas comparadas con otras tensiones del circuito [13]. El criterio de selección de los interruptores electrónicos fue la velocidad de conmutación y el nivel de potencia, así mismo, para el puente convertidor, se han empleado como dispositivos conmutadores a Transistores de efecto de campo metal-oxido-semiconductor (MOSFET), por ser, dentro de los adecuados, los disponibles en el mercado y a precio más asequible.

La salida de pulsos del microcontrolador no fue entregada directamente a los dispositivos de conmutación, sino que sus señales de disparo fueron entregadas a través

de drivers, que se encargaron de recibir los pulsos a las tensiones del circuito lógico y convertirlas en pulsos de disparo a las tensiones de trabajo de los MOSFET. Los drivers también hacen de protección para los dispositivos de conmutación, ya que independizan las tensiones de disparo del circuito de pulsos del microcontrolador, de forma que si ocurre alguna anomalía en los circuitos circundantes que afectara los pulsos, las tensiones de disparo entregadas a los MOSFET no salgan de sus valores normales.

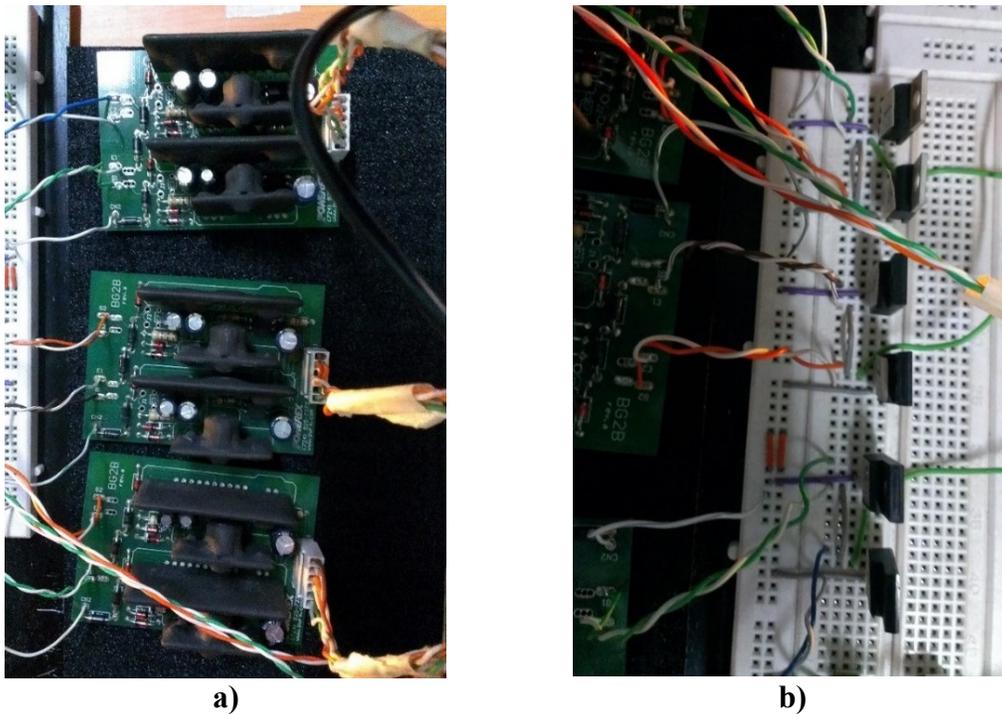


Figura 3.13 a) Drivers de disparo para los interruptores electrónicos b) Interruptores electrónicos (MOSFET's)

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Se observa en la Figura 3.13 el montaje de los drivers y su conexión con los seis interruptores electrónicos, y en la Figura 3.14, se observa el banco de baterías utilizado como bus DC para el equipo de inyección, que a su vez se encuentra conectado con los interruptores electrónicos.



**Figura 3.14 Banco de baterías usado como bus DC para el equipo de inyección.
Fuente: Carvajal y D'Andrea**

3.2.3 Protecciones

Se empleó un circuito que se encargó de comparar los valores recibidos por los sensores, habiendo sido amplificados, con tensiones de 1.65 y -1.65 V. Si los valores de entrada superan estas tensiones, esto se interpreta como una falla en el sistema, ya que alguna de las variables reales ha excedido los valores esperados de trabajo, siendo esto una condición anormal del sistema, el circuito de protecciones se encarga de deshabilitar la acción del microcontrolador.

Las salidas de los comparadores se llevan a compuertas lógicas sumadoras, de forma que de haber falla en cualquiera de las variables, se activan las protecciones. El esquema de protecciones se presenta en la Figura 3.15.

Se puede observar el montaje del circuito de protecciones en la Figura 3.20 a), donde se observa el montaje de los circuitos de protección y adquisición de datos.

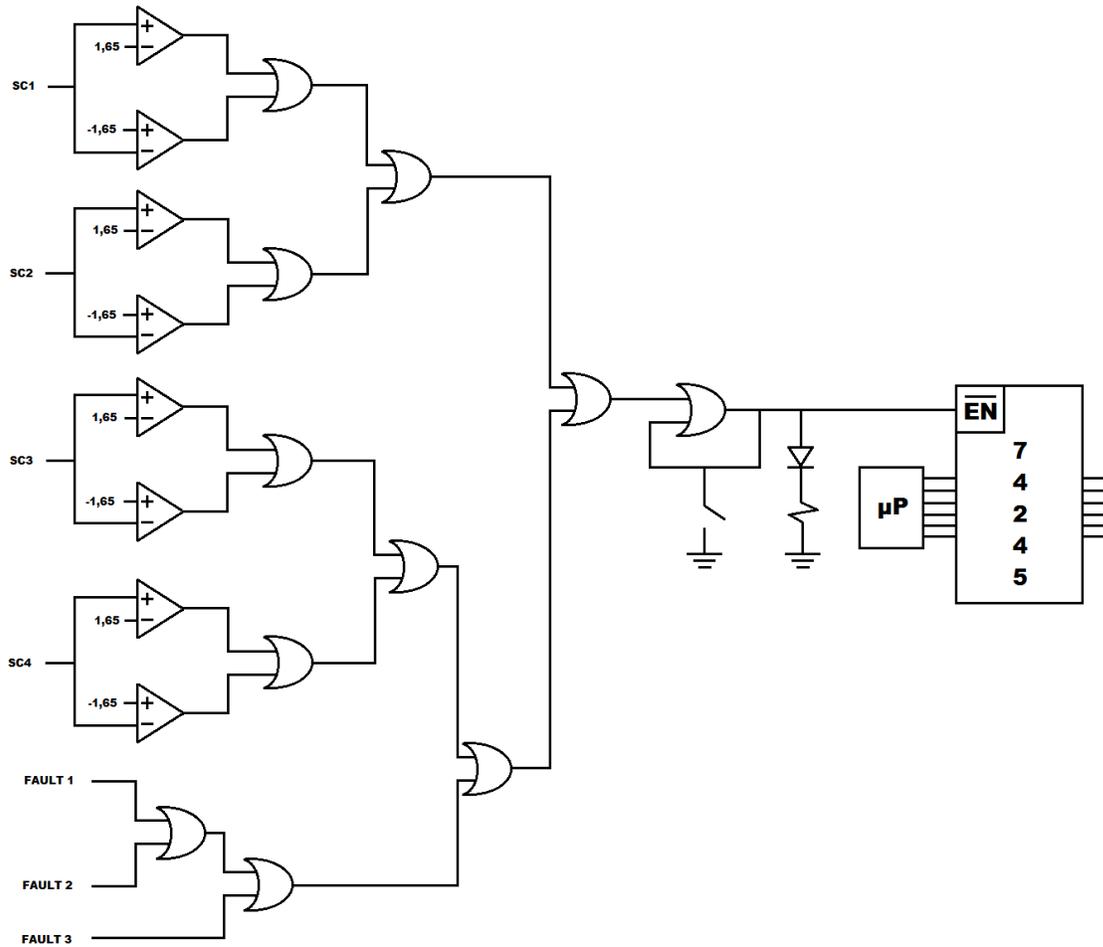


Figura 3.15 Esquema de protecciones
Fuente: Carvajal y D'Andrea

3.2.4 Adquisición de los equipos y ensamblaje de las partes

Se procedió a la enumeración, búsqueda y compra de los equipos y materiales necesarios para el ensamblaje del sistema de potencia, del sistema de inyección y los circuitos correspondientes a adquisición de datos, protecciones y procesamiento para la elaboración de este trabajo especial de grado.

3.2.5 Ejecución de pruebas de funcionamiento

A medida que se ensamblaron las diferentes partes del sistema de inyección, se realizaron las pruebas de funcionamiento correspondientes para cada subsistema, en las cuales se tomaron acciones correctivas y se logró que las partes constitutivas del mismo, individualmente, funcionaran correctamente.

3.2.6 Ensayos de inyección de energía

Se ensayó el sistema de inyección construido en sincronismo con el sistema eléctrico diseñado y la carga seleccionada para verificar el funcionamiento del esquema y el cumplimiento del objetivo general de este trabajo especial de grado. Los resultados obtenidos de estos ensayos se encuentran en el capítulo 4.

3.3 Población y muestra

Del universo de sistemas eléctricos de potencia de corriente alterna a los cuales es posible implementar inyección de energía, este trabajo especial de grado, se enfocó en aquellos de naturaleza trifásica, debido a que los métodos estudiados durante su elaboración son solo aplicables a los sistemas de este tipo.

Se tomó como muestra al sistema eléctrico de potencia trifásico diseñado en la sección 3.2.2, construido con los equipos disponibles ya disposición, pertenecientes a la Escuela de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

3.4 Técnicas de recopilación, procesamiento y análisis de datos

Los datos a ser procesados fueron adquiridos mediante un circuito que recibió señales de sensores de voltaje y corriente, el cual se encarga de adecuar esta señales para poder

ser recibidas por un microcontrolador, de esta manera, este equipo se encarga de procesar estas señales y generar las salidas correspondientes para lograr los objetivos del sistema.

Para lograr acondicionamiento de las señales, se identificaron las variables a ser medidas en el sistema y que son introducidas al microcontrolador de acuerdo con el esquema de control DPC.

En la Figura 3.16, se muestra el esquema de adquisición de datos, indicando las variables del sistema que se midieron.

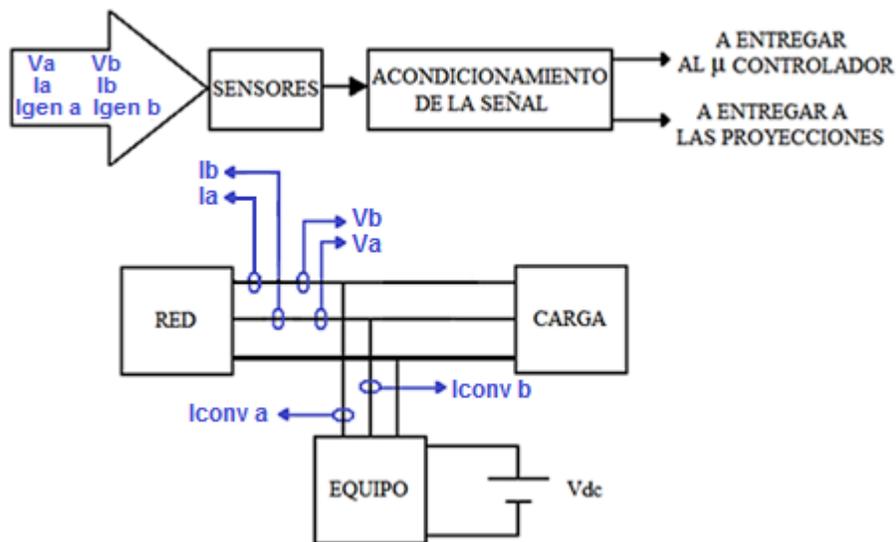


Figura 3.16 Esquema de adquisición de datos
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Para aislar el sistema de potencia del sistema de control fue necesario realizar las mediciones mediante transformadores de tensión y sensores.

Se utilizaron transformadores de tensión para obtener las tensiones de fase de la red y sensores de efecto Hall para la medición de las corrientes. El montaje de los sensores es el mostrado en la Figura 3.17 y Figura 3.18.

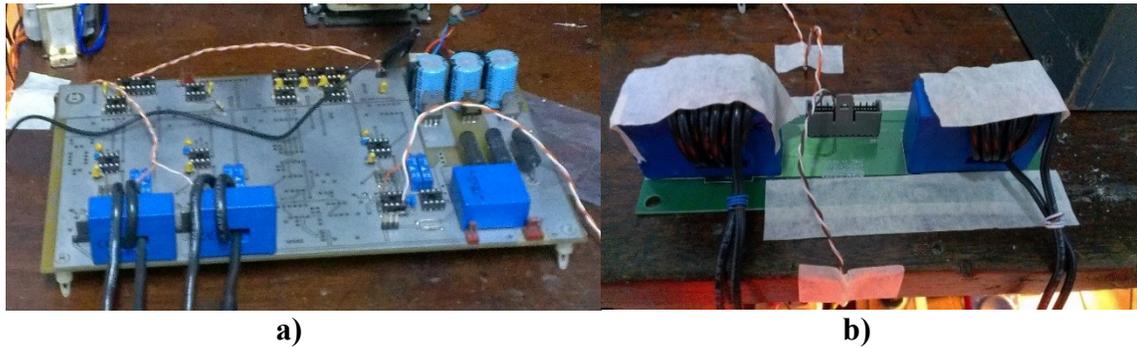


Figura 3.17 a) Tarjeta de sensores de Efecto Hall usada para la medición de las corrientes del convertidor. b) Sensores de Efecto Hall para la medición de las corrientes de la red.

Fuente: Carvajal y D'Andrea



Figura 3.18 Transformadores de tension, usados como sensores para las tensiones de fase de la red.

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Las señales medidas fueron tensiones y corrientes alternas, de forma que se hizo necesario adecuar las señales en amplitud y corrimiento de nivel para poder ser introducidas al microcontrolador y ser entregadas al circuito de protecciones. Las señales amplificadas se entregan al circuito de protecciones, y corridas de nivel al microcontrolador. En la Figura 3.19, se muestra el esquema de acondicionamiento de las señales.

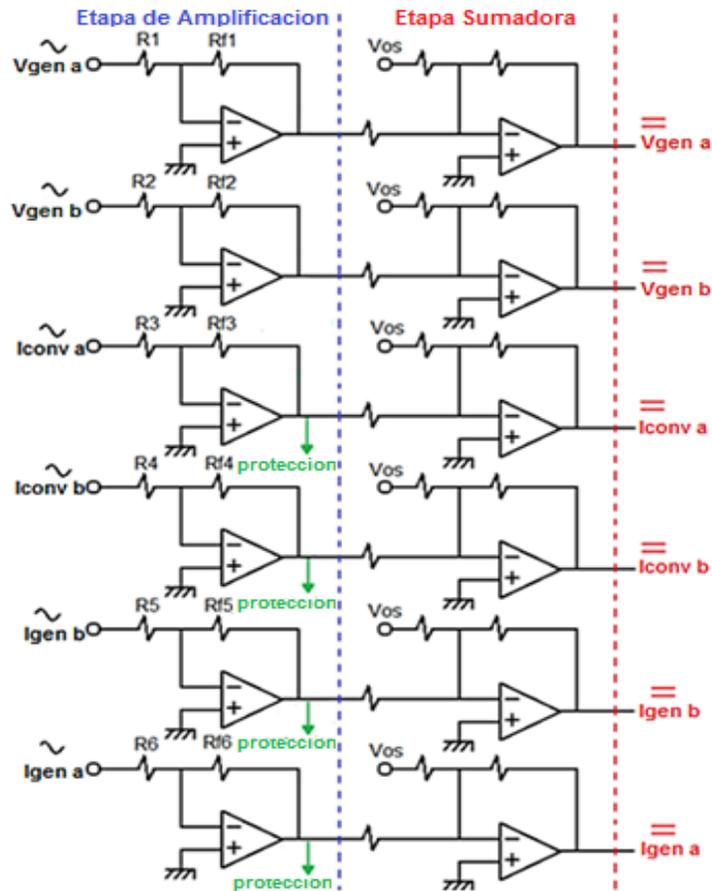


Figura 3.19 Esquema de acondicionamiento de datos
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Los datos obtenidos a través del circuito de adquisición fueron almacenados durante los ensayos para poder ser transferidos a una computadora y ser analizados.

Este almacenamiento de datos se logró mediante una etapa de módulo de comunicación y lectura de datos, la cual constó de una FPGA SPARTAN-3 que se comunicaba de manera paralela con el microcontrolador, enviando los datos de la conversión A/D de los sensores. Se escriben palabras de 12 bits al puerto del microcontrolador y la FPGA almacena esta información cada vez que se le proporciona un pulso de reloj. La FPGA se comunica por vía serial RS-232 a la pc para la descarga de los datos que posee almacenados. En la Figura 3.20 b) se observa una fotografía de la FPGA.

Capítulo 3. Marco Metodológico.

Se utilizaron instrumentos eléctricos de medición (voltímetros, amperímetros) para observar las variables indicadoras del desempeño del equipo de inyección durante la ejecución de ensayos.

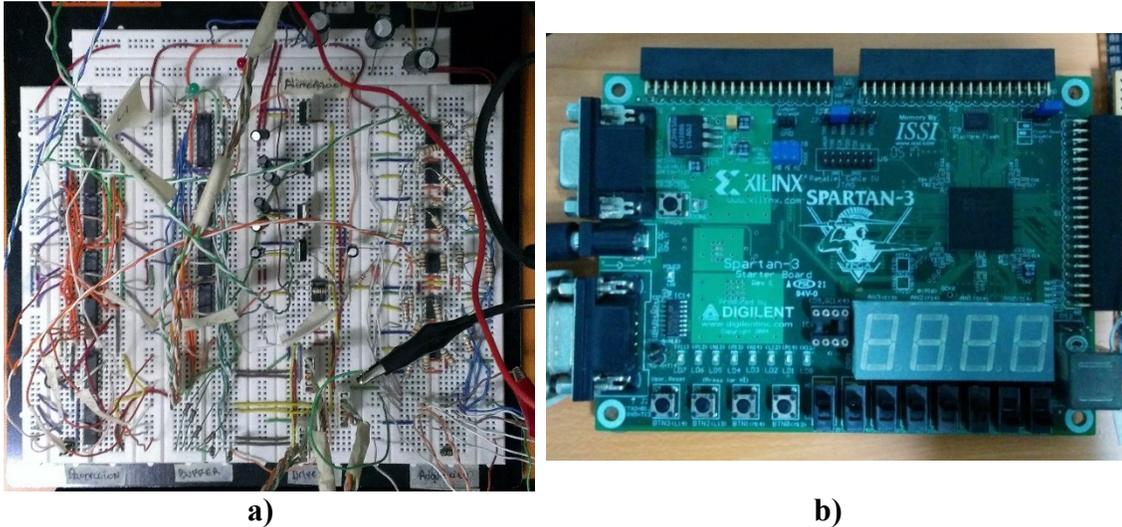


Figura 3.20 a) Montaje del circuito de protección y del circuito de adquisición de datos. b) FPGA utilizada para la adquisición y almacenamiento de datos.

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 3. Marco Metodológico.

Capítulo 4

Presentación y Análisis de Resultados

Se encontró que los esquemas más utilizados para inyección de energía mediante convertidores electrónicos de potencia, son el marco de referencia síncrono y el control directo de potencia (SRF y DPC por sus siglas en inglés, respectivamente). Se partió de los esquemas básicos de los métodos de control estudiados en la sección 2.2.3.

Se realizaron simulaciones de ambos métodos de control, estando bajo las mismas condiciones de carga y referencias de potencia, con el equipo de inyección de energía conectado en paralelo con el mismo modelo de red, y con el mismo equipo de inyección de energía.

Para comprobar el funcionamiento de los métodos, se le dio a ambos referencias a seguir y se observaron los resultados obtenidos, para el caso del método DPC, referencias de potencia, y para el caso del método SRF, referencias de corriente proporcionales a las potencias dadas al método DPC, ya que bajo estas condiciones, se exige lo mismo a ambos sistemas de control.

La frecuencia de trabajo fue de 30 Hz, debido a que, mediante las ecuaciones estudiadas en 2.2.2.5, se consiguió que al mantener la inductancia y el voltaje de la fuente de continua constantes era posible obtener más potencia del sistema y lograr trabajar con

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

voltajes de fuente de alterna más elevados. En este sentido, el voltaje de trabajo simulado fue de 10 V de línea a línea rms, escogido así tomando en consideración que en las ecuaciones 2.17 y 2.18 se desprecian las resistencias asociadas a la bobina del equipo de inyección de energía y que tampoco toman en cuenta las pérdidas en el sistema debidas a los armónicos en las corrientes del convertidor.

La carga, para ambos casos, será del tipo RL de 150 W y 120 VAR (potencia constante), la cual debía ser cubierta en un 10% por el equipo de inyección de energía en los momentos en que la referencia se establecía en inyección.

Entonces, se establecieron referencias iguales para ambos métodos, pero que varían con el tiempo, como se muestra en la Figura 4.1, de esta manera, se tuvieron las combinaciones posibles entre potencias activa y reactiva en modo de inyección de energía y en modo de absorción de energía de la red.

Con esto, se sombrearon los bloques de medición de carga, del equipo de inyección y de la red en naranja, verde y azul respectivamente. Los esquemas de simulación y los resultados de las mismas se encuentran a continuación:

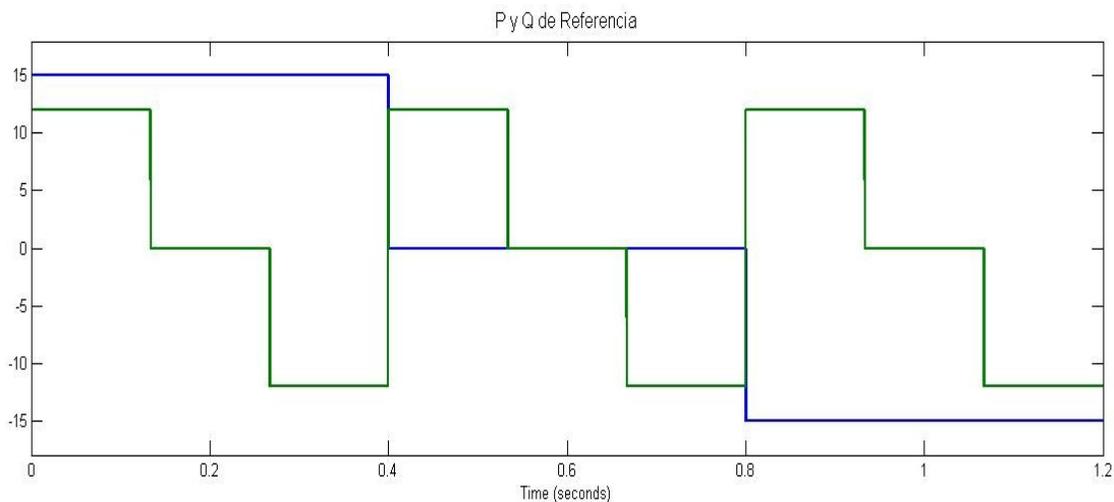


Figura 4.1 Referencia de potencia a seguir por los métodos de control
Fuente: Carvajal y D'Andrea

4.1 Marco de referencia Síncrono (SRF)

De la Figura 4.2, el control se encuentra ubicado en el bloque denominado SRF. Se sombrearon los bloques de medición de carga, del equipo de inyección y de la red en naranja, verde y azul respectivamente.

Cada bloque será expandido para su visualización.

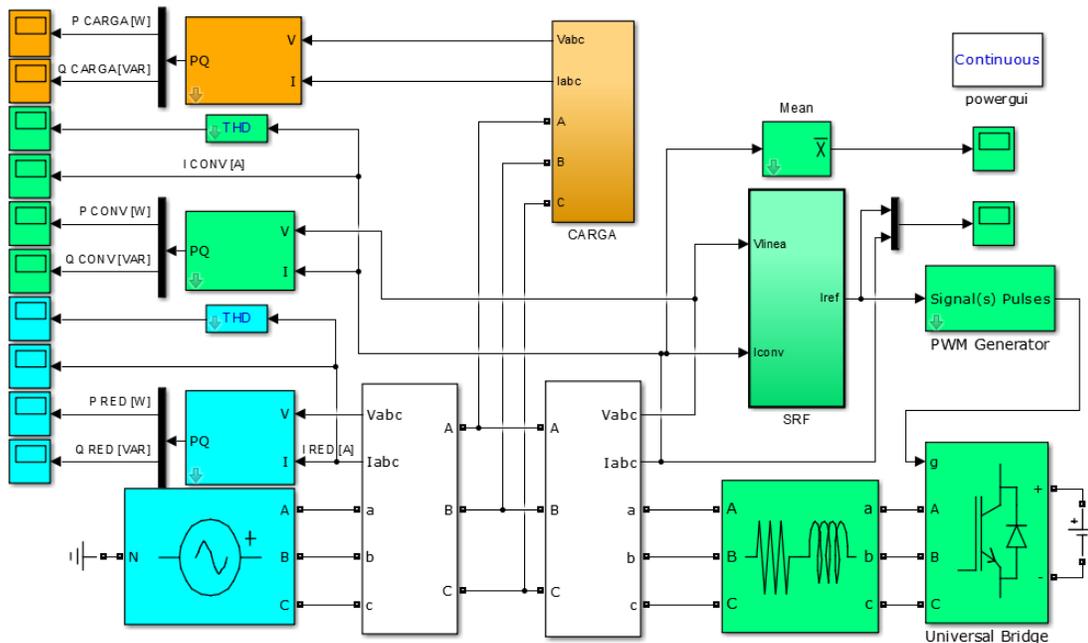


Figura 4.2 Esquema del Marco de Referencia Síncrono (SRF)

Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.3 se observa el bloque de carga usado en la simulación y en la Figura 4.4, se observa el esquema de control modelado, que consta de la medición instantánea de las corrientes del convertidor para ser transformadas al eje dq0 (ver Anexo A.2), de esta transformada se obtienen valores DC de las corrientes. Dichas corrientes son comparadas con las referencias de corriente (que son proporcionales a las referencias de potencia descritas anteriormente) y el resultado de esta comparación pasa por un controlador PI. De aquí, se realiza transformada inversa y se obtienen las corrientes a ser entregadas a un

modulador PWM, que traduce las señales sinusoidales de corriente en pulsos de conmutación para el puente inversor.

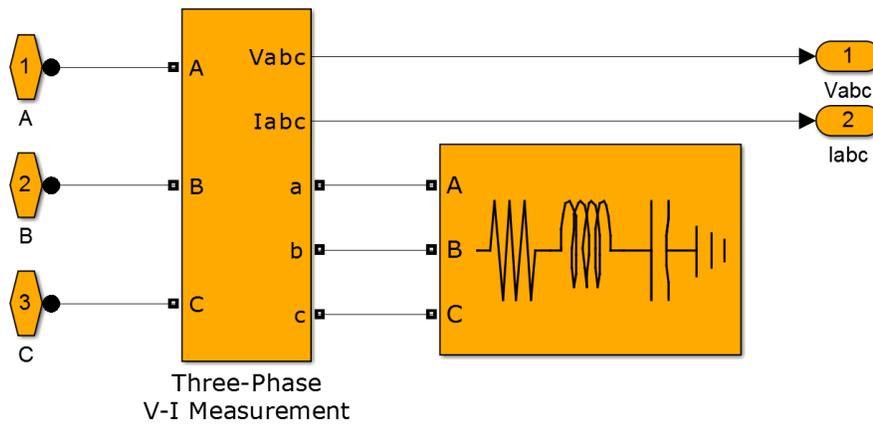


Figura 4.3 SRF: Bloque de carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

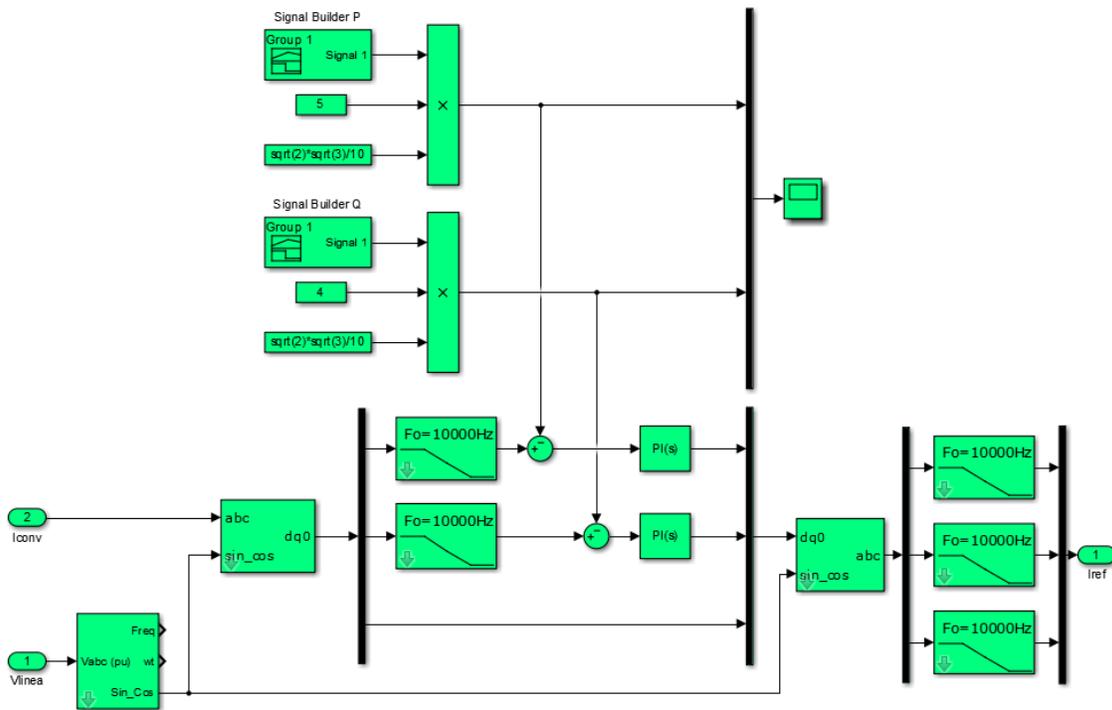


Figura 4.4 SRF: Bloque SRF
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.5 y la Figura 4.6, se observan las potencias activa y reactiva respectivamente de la carga en el tiempo. Las cuales permanecen constantes en 50 W y 40 VAR, ya que la tensión del sistema y la impedancia de la carga no se modifican.

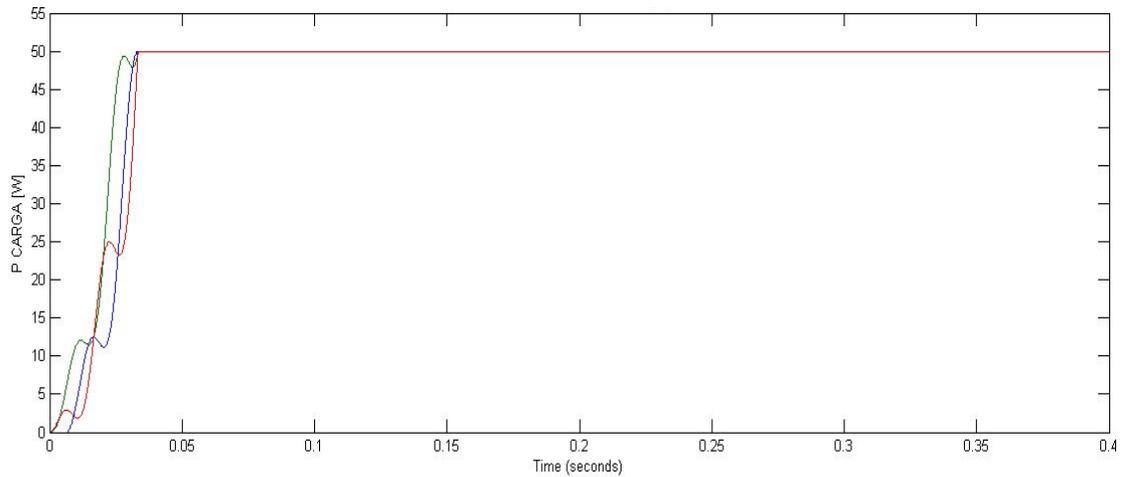


Figura 4.5 SRF: Potencia activa de la carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

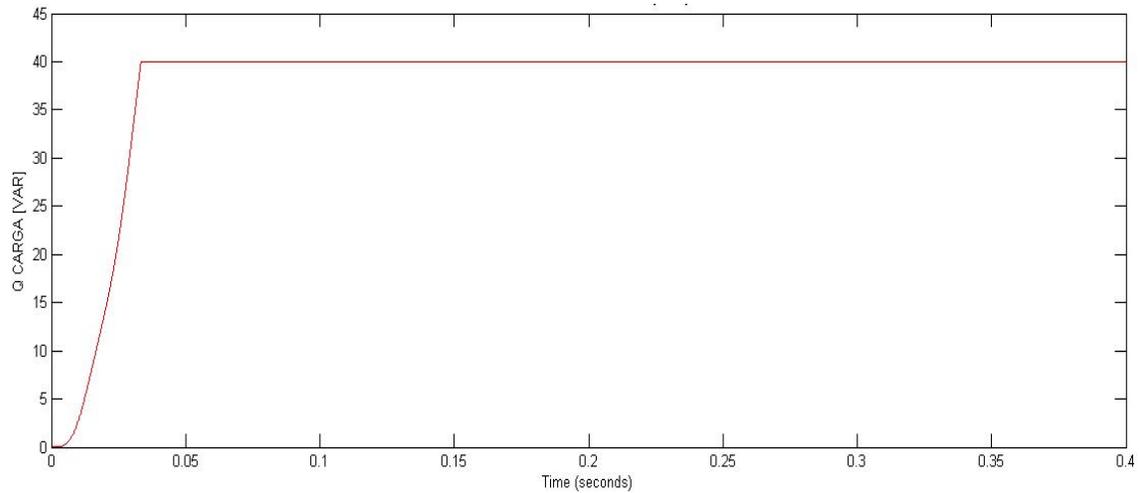


Figura 4.6 SRF: Potencia reactiva de la carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

En la Figura 4.7 se observa la potencia activa entregada al sistema por el equipo de inyección, la cual oscila en valores de 5 y -5, y en la Figura 4.8 se observa la potencia reactiva entregada al sistema por el equipo de inyección, la cual oscila en valores de 4 y -4, valores que se traducen en que el sistema está absorbiendo (valores positivos de potencia) e inyectando (valores negativos de potencia) energía a la red.

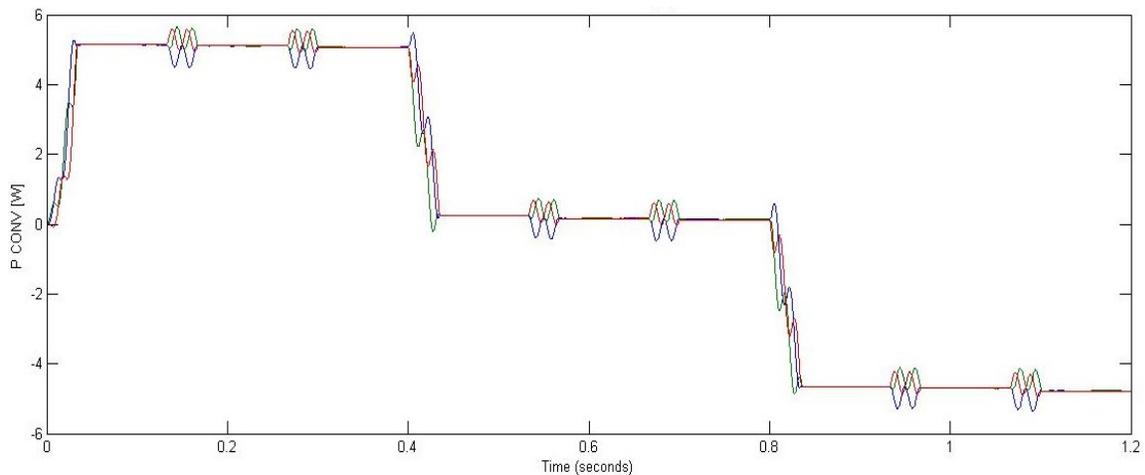


Figura 4.7 SRF: Potencia activa entregada al sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

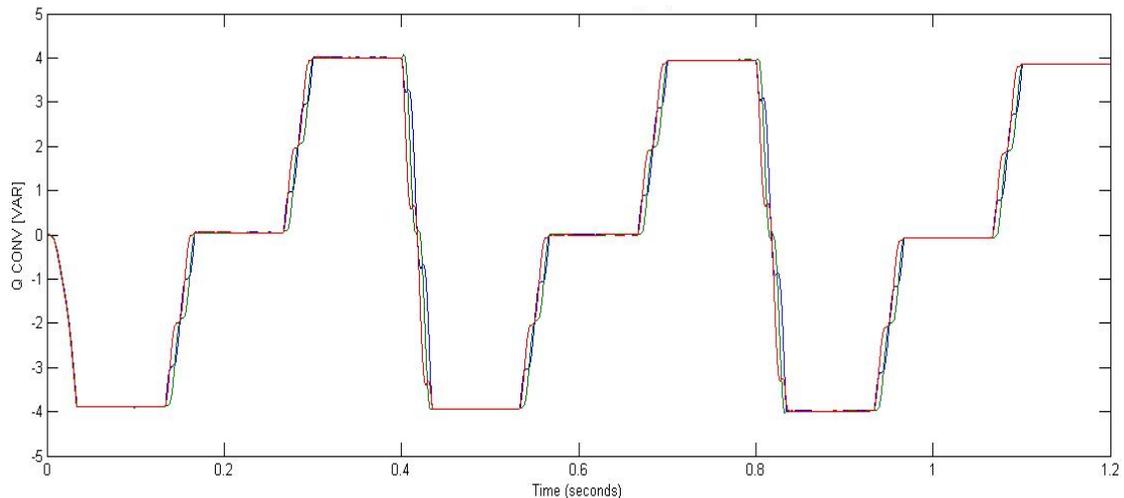


Figura 4.8 SRF: Potencia reactiva entregada al sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.9 y la Figura 4.10 se observan las potencias activa y reactiva entregadas por la red eléctrica, las cuales son la suma de la potencia de la carga y la potencia del sistema de inyección. Cuando la acción del sistema es inyectar energía, se observa que la red eléctrica entrega menos potencia, ya que parte de la carga está siendo cubierta por el sistema de inyección.

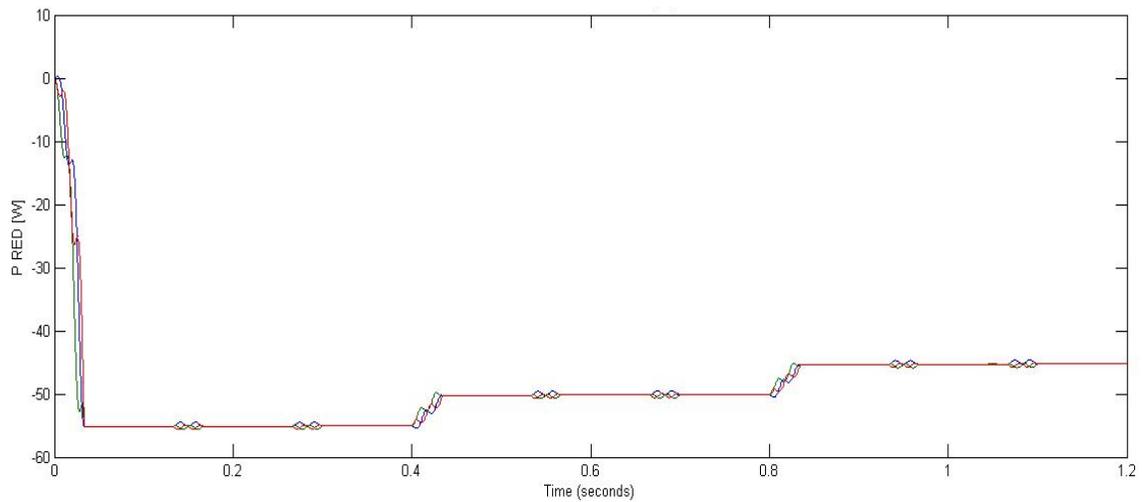


Figura 4.9 SRF: Potencia activa entregada por la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

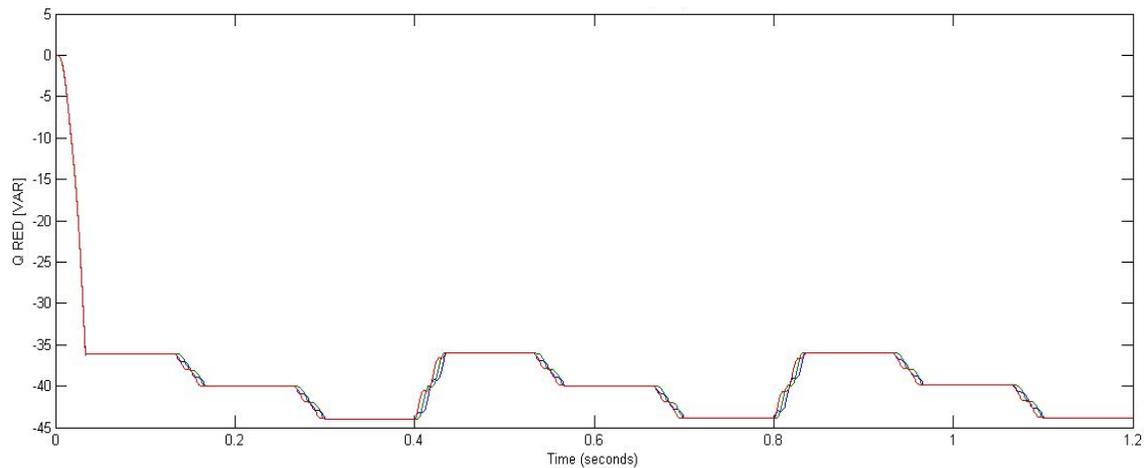


Figura 4.10 SRF: Potencia reactiva entregada por la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

En la Figura 4.11 se presentan las corrientes del convertidor. Se observa que las corrientes del equipo de inyección se encuentran en sincronía con la red eléctrica, esto se logra mediante la generación de las corrientes de referencia del método SRF, que son el resultado de una transformación de Park que constantemente se encuentra recibiendo el ángulo de rotación de los ejes dq de la red eléctrica.

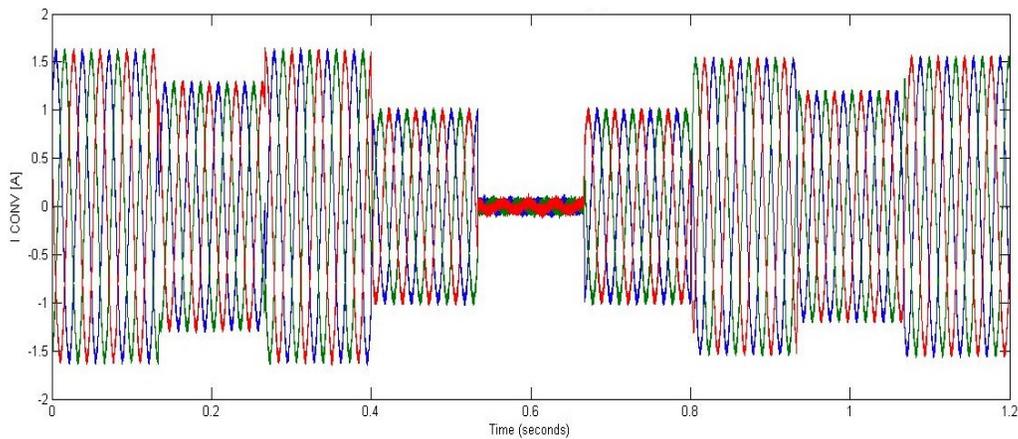


Figura 4.11 SRF: Corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Cuando la acción del sistema es inyectar energía, al igual que con las potencias, se puede observar en las corrientes que en la red eléctrica son menores, ya que parte de la carga está siendo cubierta por el sistema de inyección, como se puede observar en la Figura 4.12.

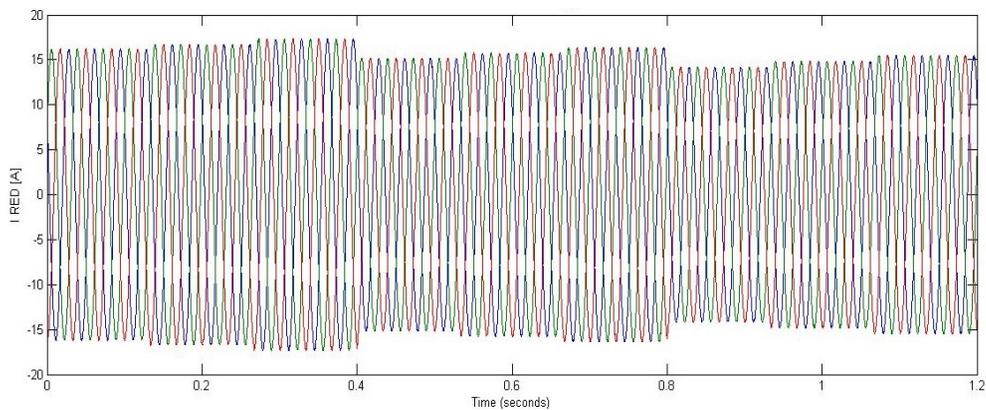


Figura 4.12 SRF: Corriente de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Los dispositivos de conmutación añaden contenido armónico a las redes eléctricas por tener la característica de ser cargas no lineales. En este sentido, al conectar el sistema de inyección en paralelo con la red eléctrica, se distorsionarán sus corrientes; como los sistemas no son ideales, las tensiones de la red eléctrica también se ven afectadas. En la Figura 4.13 y la Figura 4.14 se observan los cambios en la distorsión armónica total de la corriente del convertidor y de la corriente de la red, respectivamente:

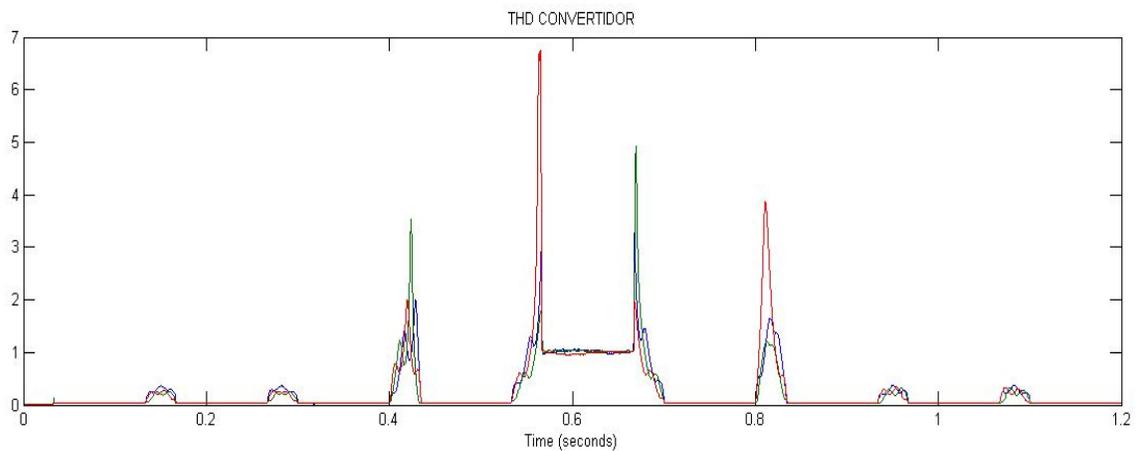


Figura 4.13 SRF: Distorsión armónica total de la corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

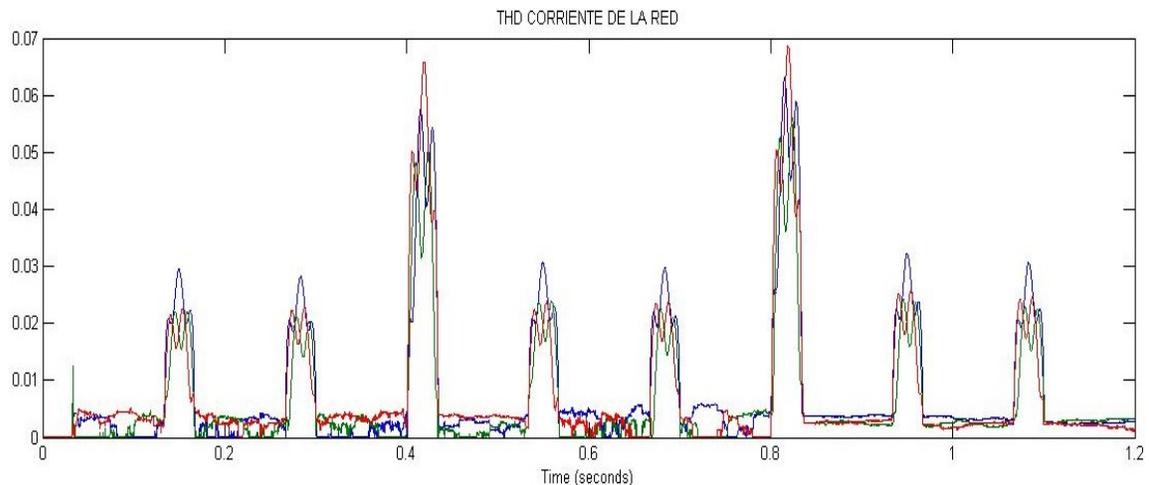


Figura 4.14 SRF: Distorsión armónica total de la corriente de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

4.2 Control Directo de Potencia (DPC)

En la Figura 4.15, el control se encuentra ubicado en el bloque denominado DPC. Cada bloque será expandido para su visualización.

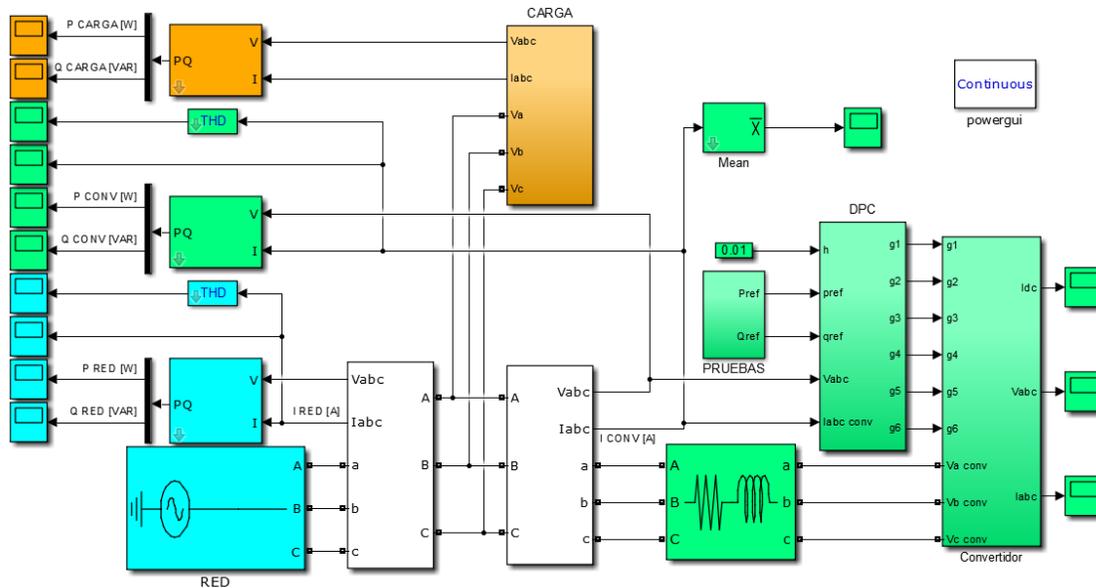


Figura 4.15 Esquema del Control Directo de Potencia (DPC)

Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.16 se observa el bloque de carga usado en la simulación, y la Figura 4.17 representa la generación de las señales de referencia de potencia a ser entregadas al control.

En la Figura 4.18 se observa el diagrama de bloques para el control DPC. El bloque de histéresis compara las potencias del convertidor calculadas con las potencias de referencia y da la señal a la tabla de conmutación sobre la acción que se debe tomar. Si el error entre la referencia y la medida supera un cierto umbral h , llamado banda de histéresis, las salidas del bloque se hacen 1, de lo contrario, se hacen cero.

La tabla de conmutación recibe la información del bloque de histéresis y selecciona los vectores adecuados que desfazan las tensiones del convertidor electrónico de potencia o aumentan o disminuyen sus amplitudes para que se modifique la trayectoria de la

intensidad y así lograr que el error se encuentre dentro de la banda de histéresis y se siga la referencia de potencia.

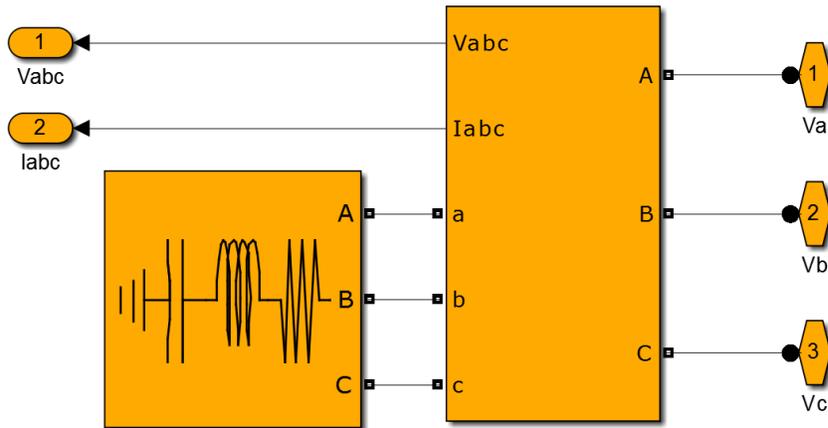


Figura 4.16 DPC: Bloque de carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

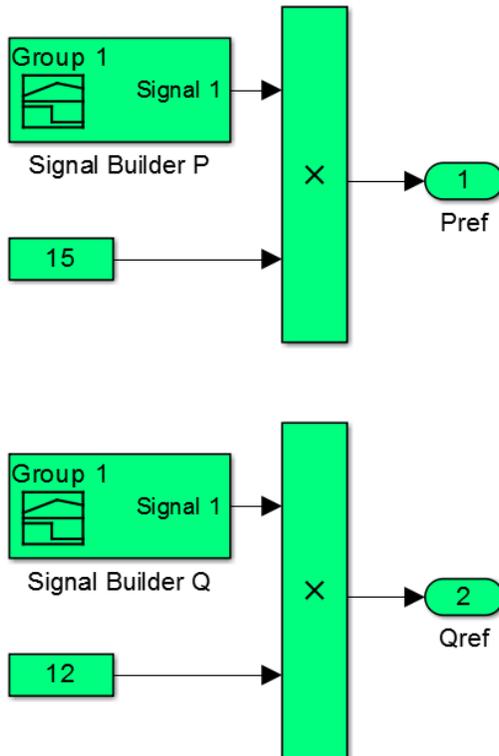


Figura 4.17 DPC: Bloque PRUEBAS
Fuente: Carvajal y D'Andrea

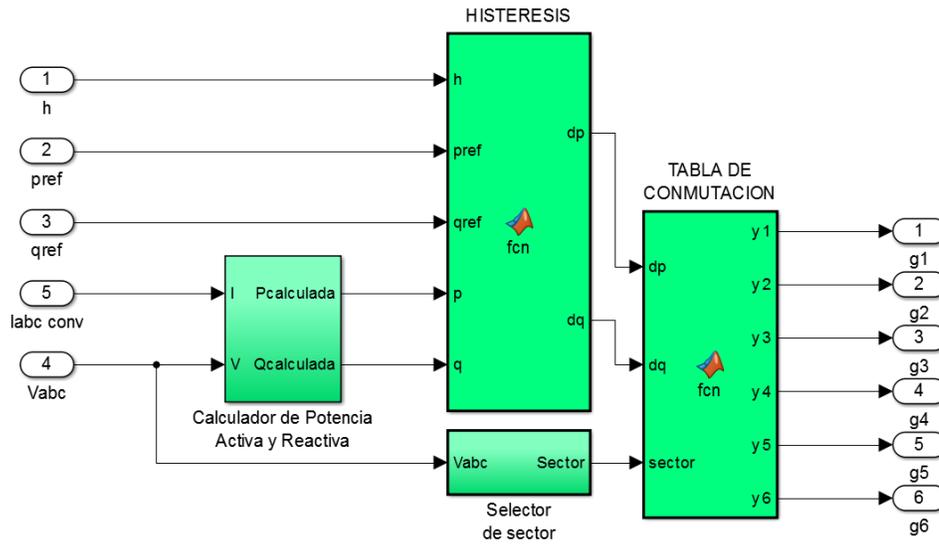


Figura 4.18 DPC: Bloque DPC
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Dentro del bloque DPC se encuentran cuatro bloques internos que conforman en conjunto el control.

El calculador de potencia (Figura 4.19) se encarga de recibir las tensiones de la red y las corrientes del equipo de inyección, realiza transformada de Clarke (ver Anexo A.1) para convertir las tensiones y corrientes trifásicas en vectores que giran en un nuevo plano a la velocidad sincrónica de la red, con estos valores, se procede al cálculo de potencia.

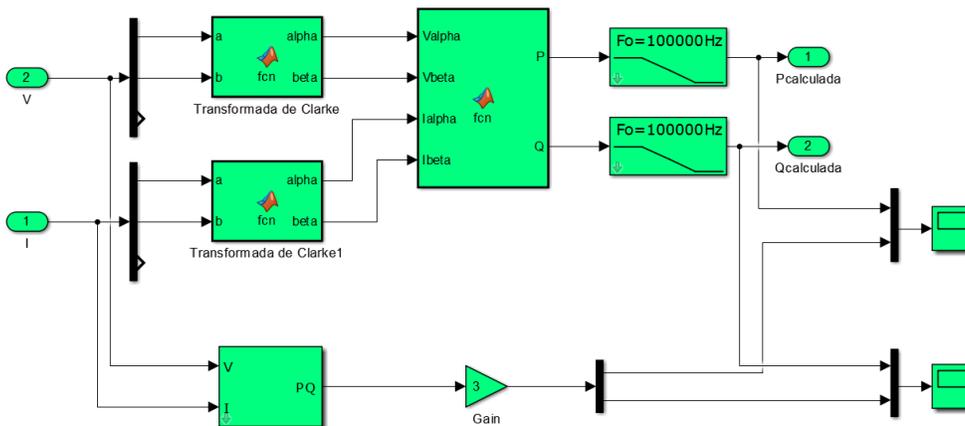


Figura 4.19 DPC: Bloque Calculador de potencia
Fuente: Carvajal y D'Andrea

El bloque selector de sector (Figura 4.20), se encarga de mantener las tensiones del sistema de inyección en sincronía con la red, realizando también la transformada de Clarke de las tensiones de fase de la red eléctrica.

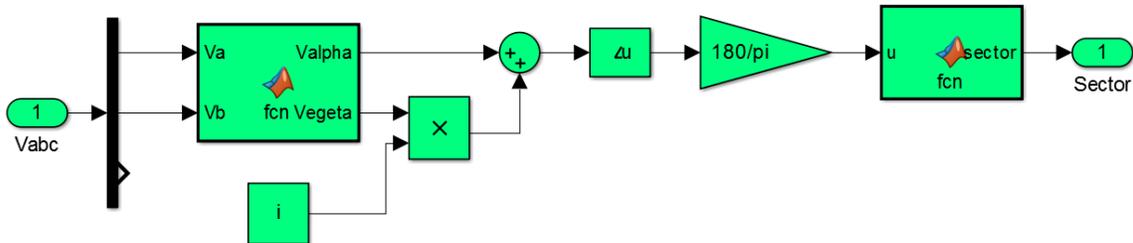


Figura 4.20 DPC: Bloque Selector de sector
Fuente: Carvajal y D'Andrea

El bloque convertidor (Figura 4.21), consta del puente de dispositivos de conmutación (convertidor eléctrico de potencia) al igual que en el modelo para el método SRF. La diferencia es la generación de los pulsos que conmutan al puente. En SRF, esto se lograba mediante modulación de ancho de pulsos, en DPC, mediante la selección de vectores de tensión.

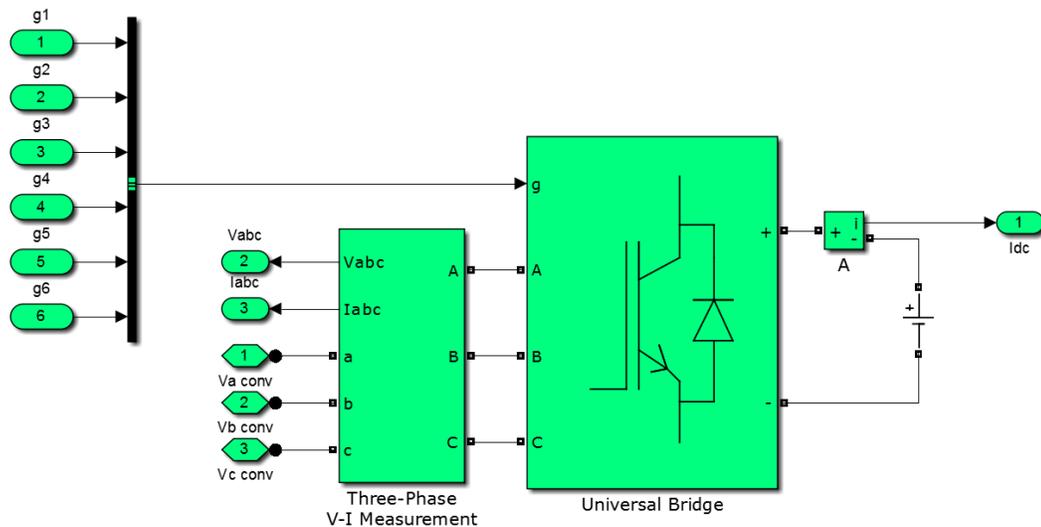


Figura 4.21 DPC: Bloque Convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Resultados de la simulación

En la Figura 4.22 y la Figura 4.23, se observan las potencias activa y reactiva respectivamente de la carga en el tiempo. Las cuales permanecen constantes en 50 W y 40 VAR, ya que la tensión del sistema y la impedancia de la carga no se modifican.

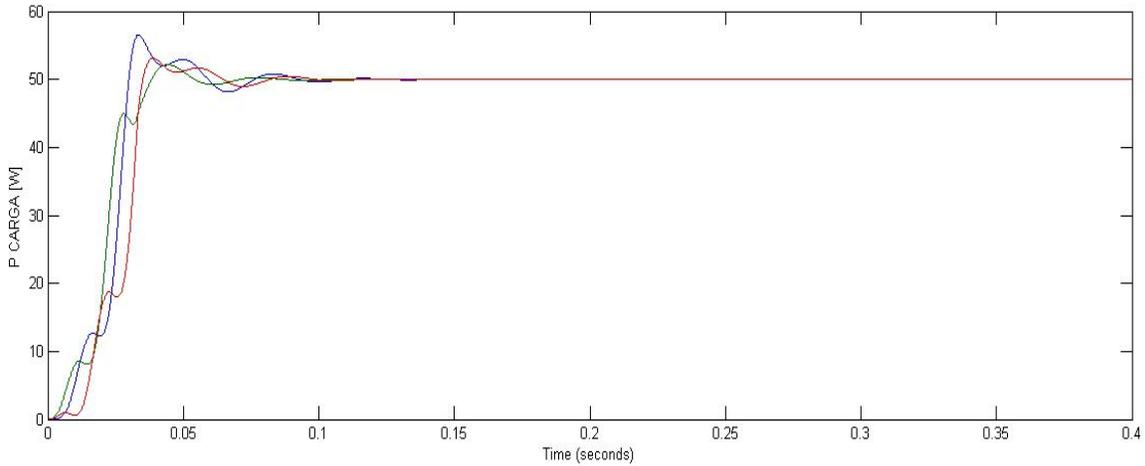


Figura 4.22 DPC: Potencia activa de la carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

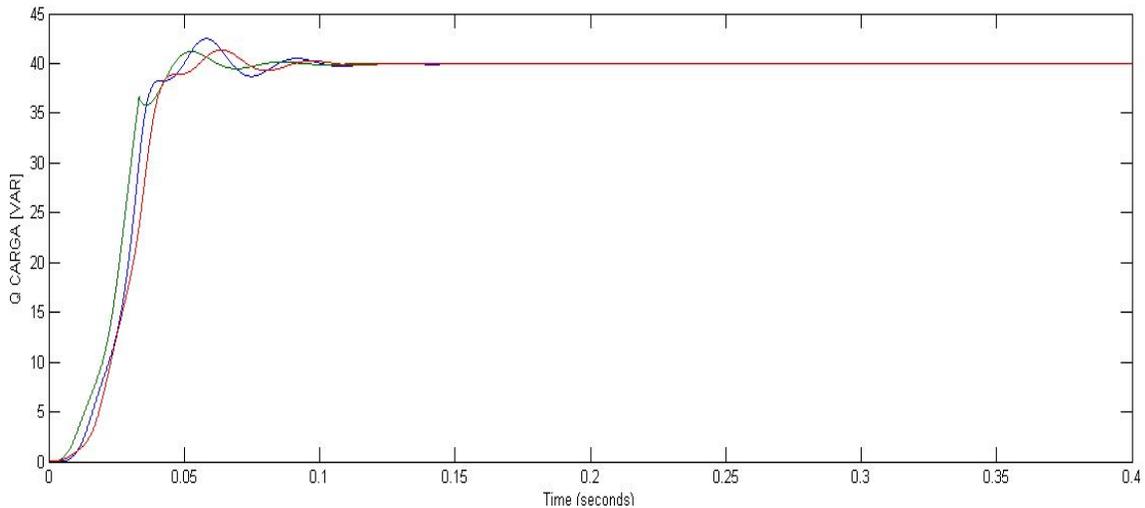


Figura 4.23 DPC: Potencia reactiva de la carga
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.24 se observa la potencia activa entregada al sistema por el equipo de inyección, la cual oscila en valores de 5 y -5, y en la Figura 4.25 se observa la potencia reactiva entregada al sistema por el equipo de inyección, la cual oscila en valores de 4 y -4, valores que se traducen en que el sistema está absorbiendo (valores positivos de potencia) e inyectando (valores negativos de potencia) energía a la red.

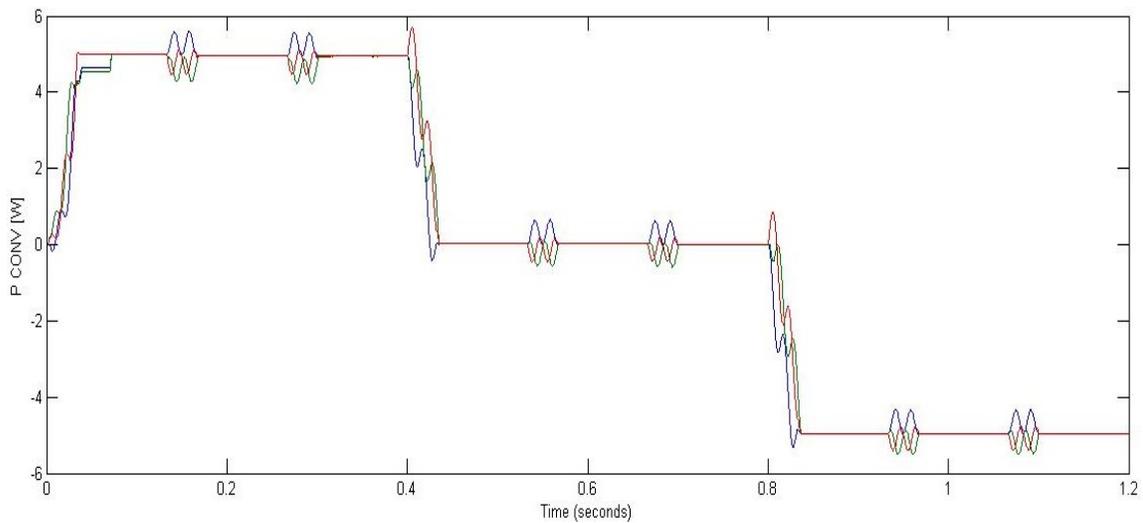


Figura 4.24 DPC: Potencia activa entregada al sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

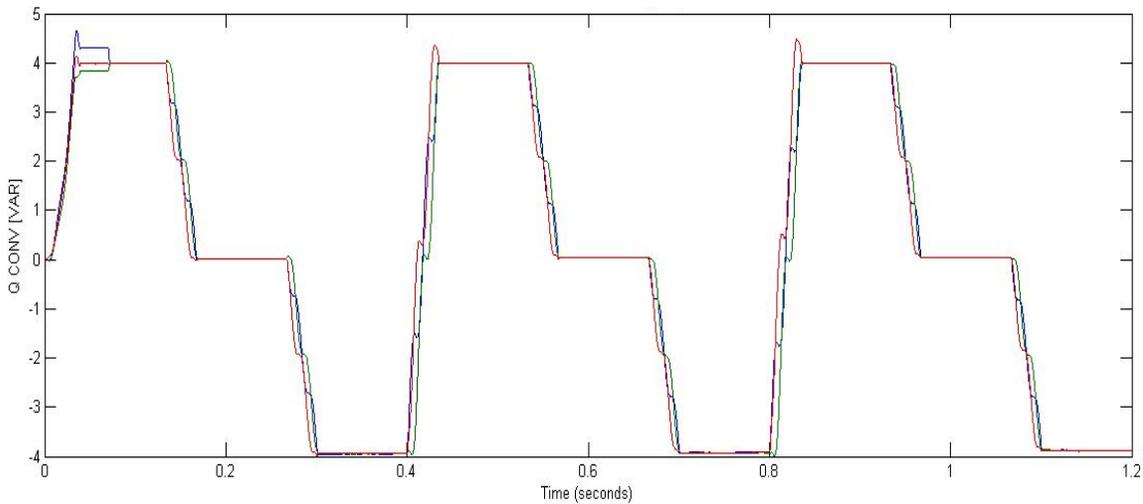


Figura 4.25 DPC: Potencia reactiva entregada al sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

En la Figura 4.26 y la Figura 4.27 se observan las potencias activa y reactiva entregadas por la red eléctrica, las cuales son la suma de la potencia de la carga y la potencia del sistema de inyección. Cuando la acción del sistema es inyectar energía, se observa que la red eléctrica entrega menos potencia, ya que parte de la carga está siendo cubierta por el sistema de inyección.

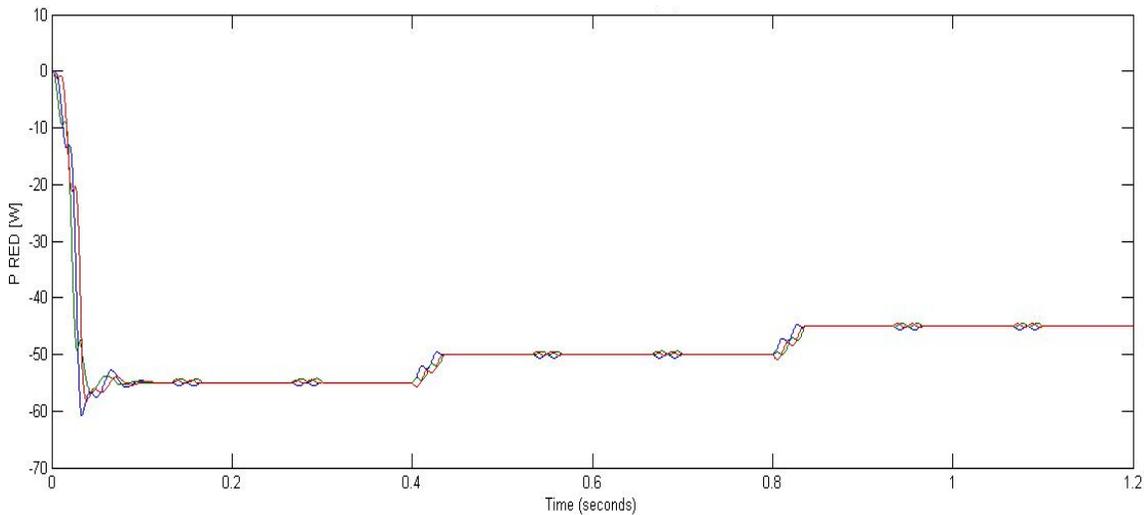


Figura 4.26 DPC: Potencia activa entregada por la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

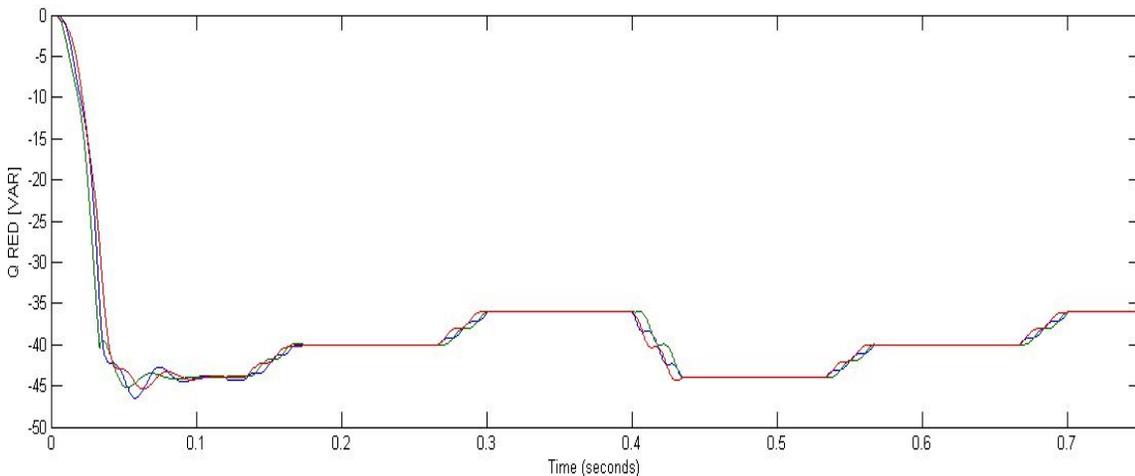


Figura 4.27 DPC: Potencia reactiva entregada por la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La sincronización de las corrientes y tensiones del sistema de inyección con la red eléctrica se logra mediante el bloque selector de sector. Se observa en la Figura 4.28 la corriente del convertidor.

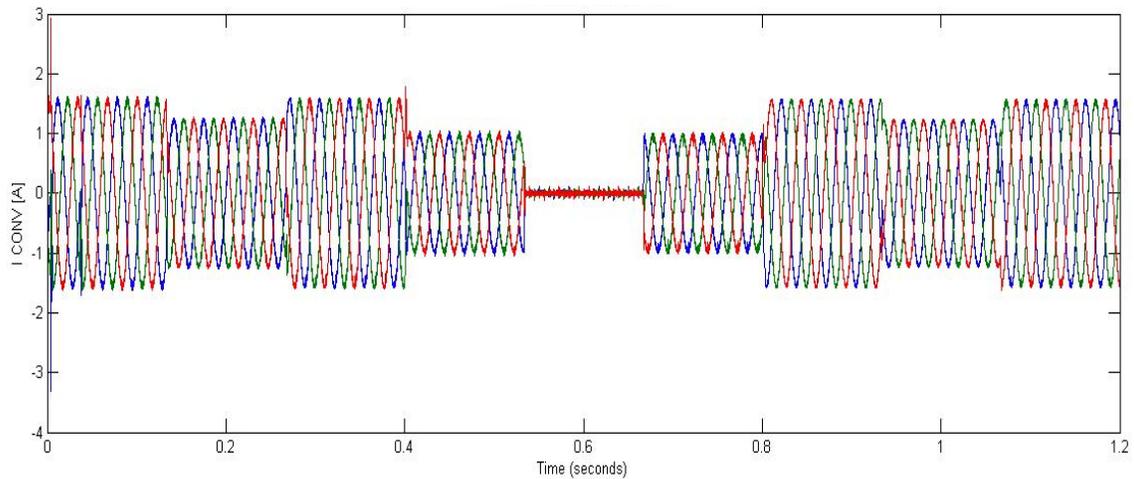


Figura 4.28 DPC: Corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Figura 4.29 se observa la corriente de la red, donde se puede apreciar una disminución en la misma en los momentos de referencia de inyección de energía:

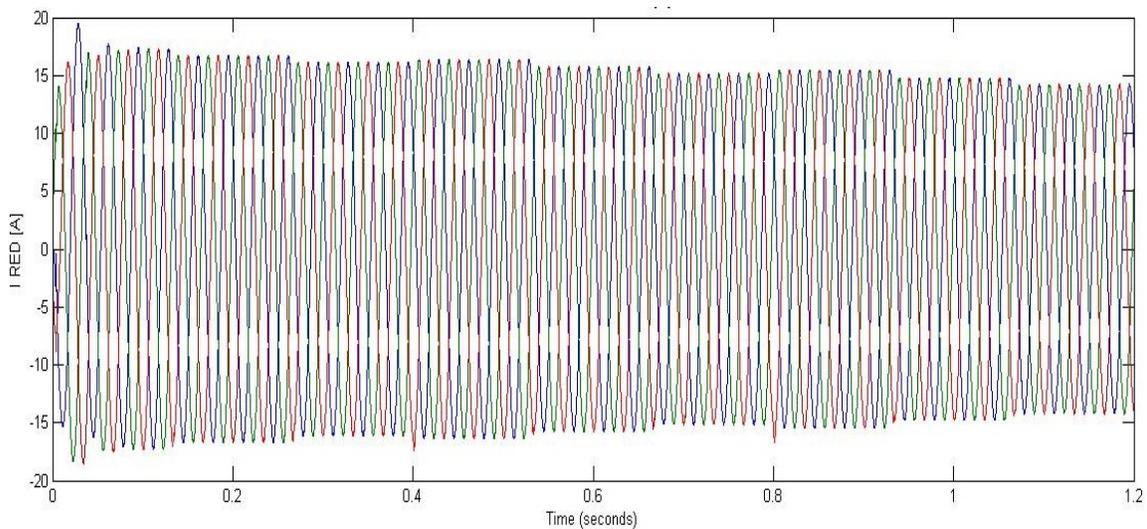


Figura 4.29 DPC: Corriente de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

Adicionalmente, se ha mencionado que el método de control DPC depende de calculadores para determinar el flujo de potencia del sistema de inyección y poder ser comparado con la referencia, en la Figura 4.30 y la Figura 4.31, se observa en azul la potencia de los bloques calculadores, el resto, son las señales de medición de potencia de bloques de la librería de Simulink; de esta manera se verificó el funcionamiento de los bloques de cálculo y se observó el error entre ellos y la medición del programa de simulación.

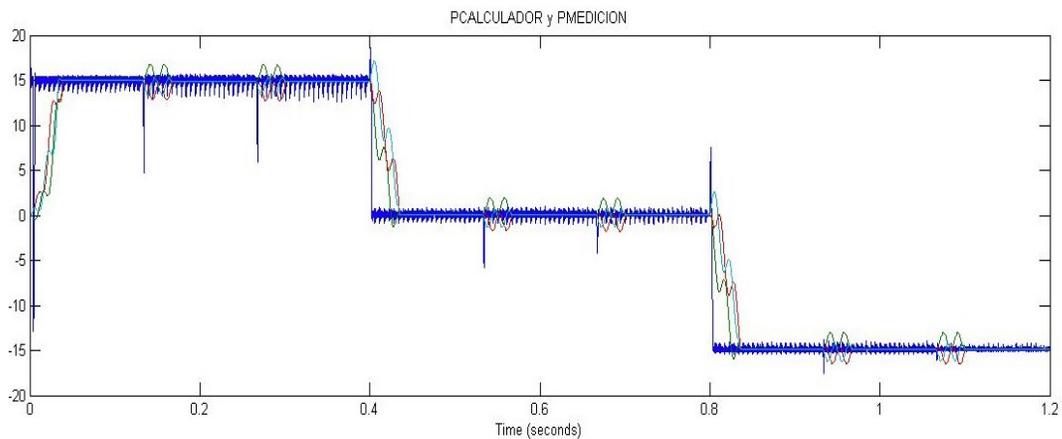


Figura 4.30 DPC: Potencia activa del calculador de potencia del esquema y potencia activa del bloque de medición de potencia en coordenadas abc
Fuente: Carvajal y D'Andrea

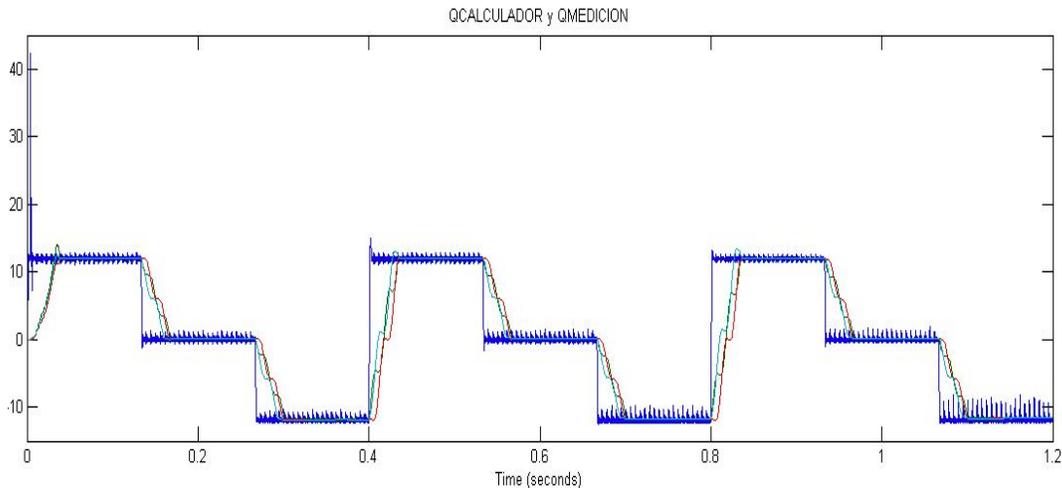


Figura 4.31 DPC: Potencia reactiva del calculador de potencia del esquema y potencia activa del bloque de medición de potencia en coordenadas abc
Fuente: Carvajal y D'Andrea

De igual manera, se realizó la medición de la distorsión armónica total de la corriente del convertidor y de la corriente de la red para determinar el efecto que tiene el equipo de inyección bajo el método de control DPC sobre la red, tal como se muestra en la Figura 4.32 y la Figura 4.33:

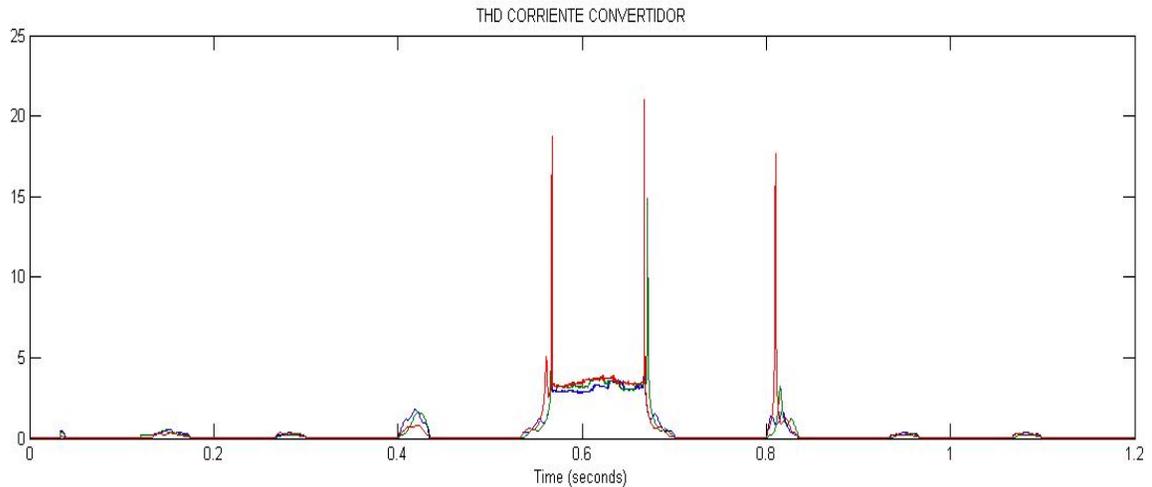


Figura 4.32 DPC: Distorsión armónica total de la corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

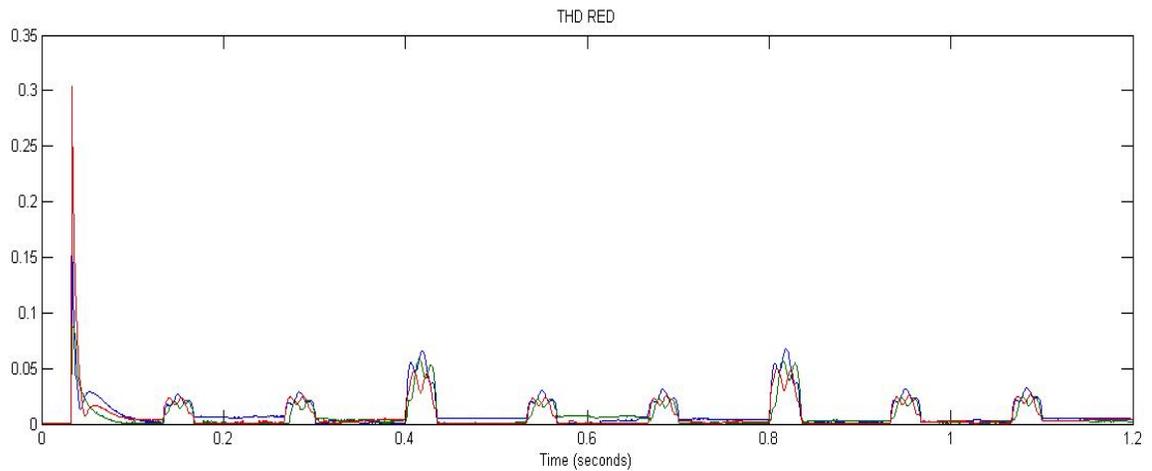


Figura 4.33 DPC: Distorsión armónica total de la corriente de la red
Fuente: Carvajal y D'Andrea

4.3 Resultados de simulación para SRF y DPC

Se midió el tiempo de respuesta y la perturbación en las potencias mientras se realizaban algunos cambios en el sistema para ambos métodos de control.

Se consideraron dos puntos clave para el análisis de los métodos de control. El primero fue la eficacia con la que el sistema siguió la referencia dada de potencia, y el segundo, la cuantificación de la perturbación del sistema de inyección de energía sobre la red eléctrica.

En la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2 se presentan los resultados de potencia obtenidos en la simulación del método SRF y DPC respectivamente, para diferentes referencias de potencia, así como los errores obtenidos para cada caso. Se observa, que para SRF el máximo error siguiendo la referencia de potencia activa fue de 0,35 W, y para potencia reactiva de 0,135 VAR. Mientras que en DPC, el máximo error de seguimiento de potencia activa fue de 0,056 W y de potencia reactiva de 0,1276 VAR.

Tabla 4.1 SRF: Resumen de resultados de potencia

| | | SRF | | | | | | | | |
|------------|-------------|------|------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-------|
| REFERENCIA | P | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| | Q | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| OBTENIDO | P | 5,14 | 5,11 | 5,08 | 0,26 | 0,17 | 0,13 | -4,65 | -4,7 | -4,78 |
| | Q | 4,01 | 0,05 | -3,898 | 3,95 | 0 | -3,94 | 3,865 | -0,07 | -3,99 |
| | ERROR [W] | 0,14 | 0,11 | 0,08 | 0,26 | 0,17 | 0,13 | 0,35 | 0,3 | 0,22 |
| | ERROR [VAR] | 0,01 | 0,05 | 0,102 | -0,05 | 0 | 0,06 | -0,135 | -0,07 | 0,01 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Tabla 4.2 DPC: Resumen de resultados de potencia

| | | DPC | | | | | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|
| REFERENCIA | P | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| | Q | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| OBTENIDO | P | 4,984 | 4,975 | 4,944 | 0,0252 | 0,0266 | 0,004 | -4,954 | -4,957 | -4,977 |
| | Q | 3,998 | 0,0225 | -3,9415 | 3,9975 | 0,0335 | -3,9276 | 4,0005 | 0,042 | -3,8724 |
| | ERROR [W] | -0,016 | -0,025 | -0,056 | 0,0252 | 0,0266 | 0,004 | 0,046 | 0,043 | 0,023 |
| | ERROR [VAR] | -0,002 | 0,0225 | 0,0585 | -0,0025 | 0,0335 | 0,0724 | 0,0005 | 0,042 | 0,1276 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos referentes a la distorsión armónica total de la corriente del convertidor, para el método SRF y DPC respectivamente. Se observa que la tendencia en el método SRF es de mayor distorsión armónica al tener referencias cero de potencia, de igual manera para DPC, exceptuando el caso de inyección de potencias activa y reactiva. Las mayores distorsiones se encuentran en los casos de referencias de potencia activa y reactiva nula, en la cual SRF tuvo una distorsión de 1,01% y DPC de 3,1%.

Tabla 4.3 SRF: Resumen de resultados de THD

| SRF | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| PREF | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| QREF | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| %THD ICONV | 0,0254 | 0,0321 | 0,0253 | 0,043 | 1,01 | 0,0408 | 0,0265 | 0,0345 | 0,0288 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Tabla 4.4 DPC: Resumen de resultados de THD

| DPC | | | | | | | | | |
|------------|--------|-------|-------|------|-----|--------|--------|--------|-------|
| PREF | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| QREF | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| %THD ICONV | 0,0212 | 0,031 | 0,027 | 0,03 | 3,1 | 0,0385 | 0,0147 | 0,0253 | 0,034 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos del tiempo de estabilización o el tiempo que tardó el control en alcanzar la referencia de potencia dada, para SRF y DPC respectivamente. Se observa que los tiempos de estabilización para ambos métodos son bastante cercanos. El mayor para SRF fue de 0,035 s y para DPC de 0,0392 s.

Tabla 4.5 SRF: Resumen de resultados de tiempos de estabilización

| SRF | | | | | | | | | |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| PREF | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| QREF | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| T RESP [s] | 0,0331 | 0,035 | 0,0337 | 0,0331 | 0,0333 | 0,035 | 0,0329 | 0,032 | 0,035 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Tabla 4.6 DPC: Resumen de resultados de tiempos de estabilización

| DPC | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PREF | 5 | | | 0 | | | -5 | | |
| QREF | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 | 4 | 0 | -4 |
| T RESP [s] | 0,0392 | 0,0347 | 0,0331 | 0,035 | 0,0343 | 0,0346 | 0,0374 | 0,0342 | 0,0343 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

4.4 Inyección de energía

Se realizaron ensayos de inyección de energía. Al conectar el equipo de inyección al sistema, tanto la velocidad como la tensión de línea del generador se modificaron. Esto sucede porque al inyectar potencia activa a la carga desde el convertidor, se produce una pérdida de carga del sistema, por lo que el motor se acelera, en caso de absorber potencia, el motor se frena. De igual manera, al inyectar o absorber reactivos, el sistema de potencia aumenta o disminuye su tensión de línea respectivamente. Para mantener los valores de frecuencia y tensión de la red constantes, se modificaron la tensión de armadura del motor DC y la tensión de salida del autotransformador trifásico, de forma que la velocidad durante los ensayos fuese siempre de 1800 rpm (lo cual corresponde con 30 Hz para el sistema) y la tensión de línea de 4 V.

Se muestran las gráficas de tensiones y corrientes obtenidas durante los ensayos. Las gráficas de potencia, fueron obtenidas a través del microcontrolador y adquiridas mediante la FPGA, las cuales fueron calculadas internamente con el bloque calculador de potencia del método DPC, el cual es el que asigna la potencia medida al control.

Las potencias también fueron calculadas mediante el análisis de Fourier de las tensiones y corrientes de la red eléctrica y del convertidor, para así poder ser comparadas con las obtenidas del bloque calculador de potencia.

A su vez, se calcularon las distorsiones armónicas totales de cada variable para analizar el efecto del equipo de inyección en el contenido armónico de la red eléctrica.

4.4.1 Sistema eléctrico sin inyección de energía

El ensayo sin inyección de energía muestra las características del sistema estando solo bajo las condiciones de carga. De esta manera, se pueden observar las características del sistema antes que sea afectado por el equipo de inyección de energía.

La Figura 4.34 muestra la tensión de la fase A de salida del autotransformador, llamada tensión de fase del sistema, y la corriente de la fase A de salida del autotransformador, que es la corriente que supe el generador.

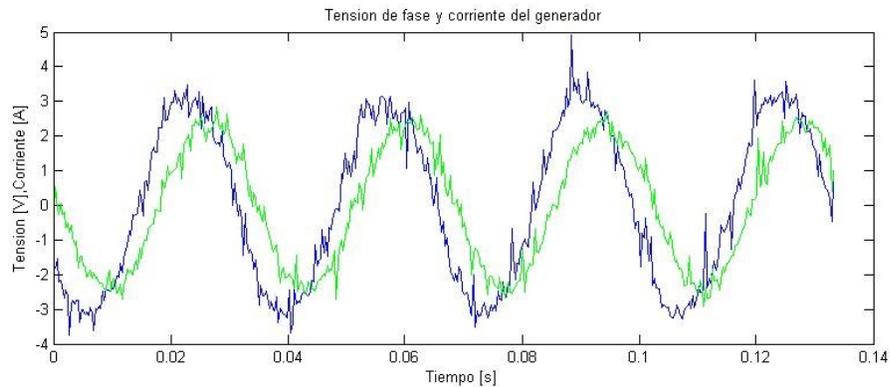


Figura 4.34 Ensayo sin inyección: Tension de fase y corriente del generador
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.35 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de tensión mostrada en azul en la Figura 4.34.

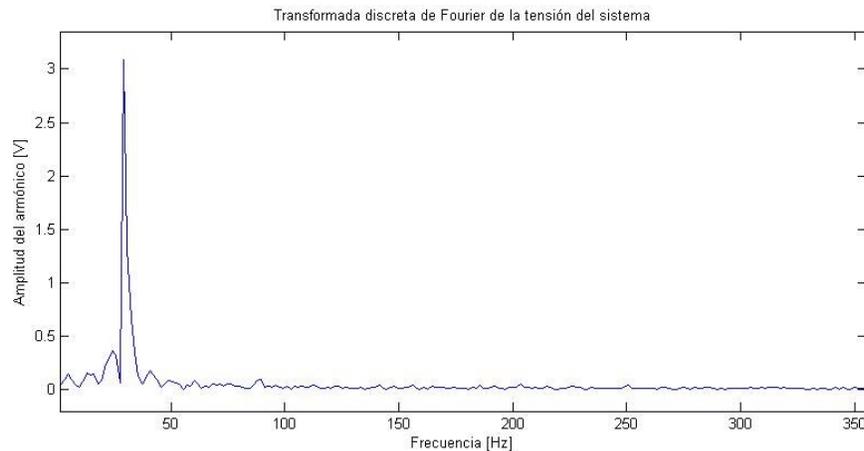


Figura 4.35 Ensayo sin inyección: Transformada discreta de Fourier de la tension del sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.36 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de corriente mostrada en verde en la Figura 4.34.

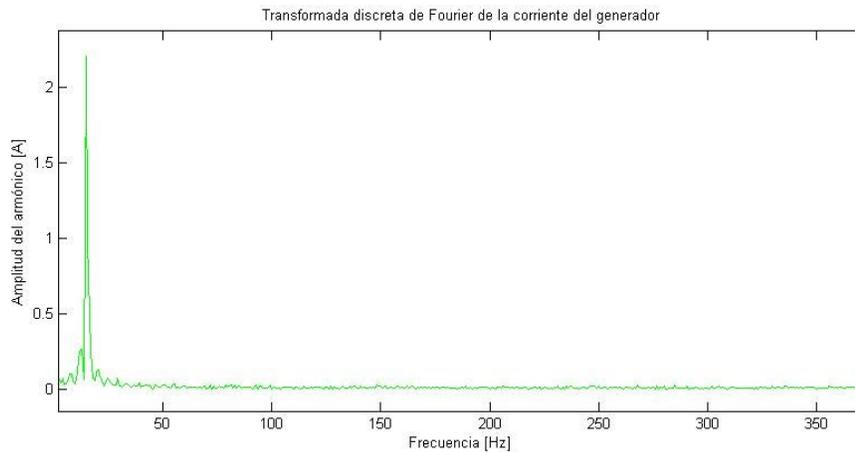


Figura 4.36 Ensayo sin inyección: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Se muestra en la Figura 4.37 la potencia activa (azul) y reactiva (verde) entregada por el generador medida a través del microcontrolador mediante el bloque calculador de potencia.

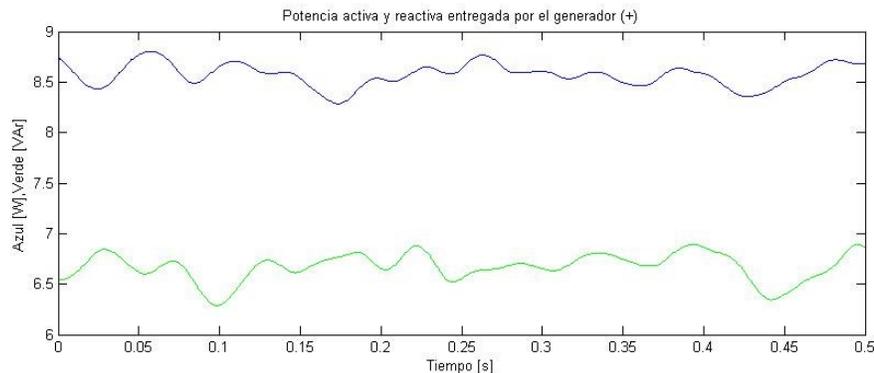


Figura 4.37 Ensayo sin inyección: Potencia activa y reactiva entregada por el generador (+)
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Tabla 4.7 se observan los resultados obtenidos de analizar las formas de onda de tensión y corriente del generador mostradas en la Figura 4.34 mediante transformada

de Fourier. Con ello, fue posible el cálculo de la distorsión armónica total (THD) y de la potencia entregada por el generador.

Tabla 4.7 Ensayo sin inyección: Cálculos de THD y potencia

| THD de la tensión de fase del sistema | THD de la corriente del generador | Potencia activa entregada por la red | Potencia reactiva entregada por la red |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 0.03597455 | 0.24652698 | 8.117806572 | 6.211717033 |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Comparando los resultados obtenidos del bloque de medición (Figura 4.37) y del análisis de Fourier (Tabla 4.7), se observa que la diferencia entre las potencias no es mayor de 1 VA, lo que para este caso quiere decir que el calculador de potencia, teniendo un rizo de 0,5 VA, otorgó valores certeros con respecto a la medición de potencia.

4.4.2 Sistema eléctrico con inyección de energía a lazo abierto

Los ensayos preliminares fueron con el método de control a lazo abierto, es decir, no se comparaban potencias medidas con potencias de referencia, sino que la orden del sistema de control era solamente inyectar energía, con esto, no se puede determinar cuanta potencia será entregada al sistema, y la única limitación de flujo de potencia fue la tensión del bus DC y la capacidad de las baterías a ceder energía.

Mediante estos ensayos, se comprobó que el sistema de inyección se encontraba en sincronismo con la red, y que era verdaderamente capaz de establecerse flujo de potencia desde el bus DC hacia el sistema de potencia.

La Figura 4.38 muestra la tensión de la fase A de salida del autotransformador (azul), llamada tensión de fase del sistema, y la corriente de la fase A de salida del autotransformador (verde), que es la corriente que supe el generador.

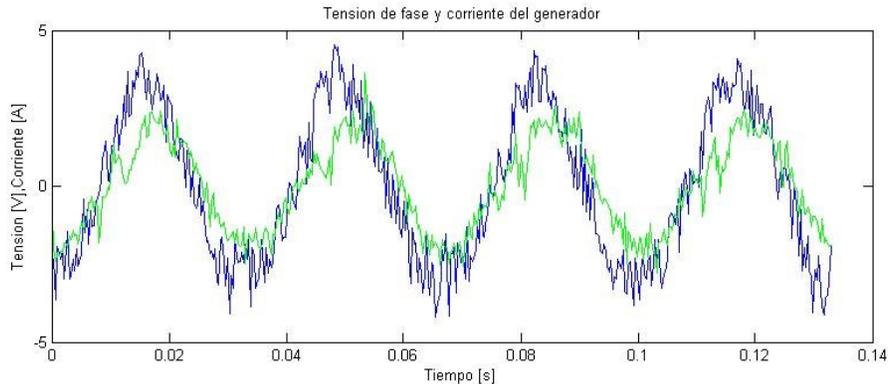


Figura 4.38 Ensayo con inyección a lazo abierto: Tension de fase y corriente del generador
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.39 muestra la tensión de la fase A de salida del autotransformador (azul), y la corriente de la fase A de salida del equipo de inyección (rojo).

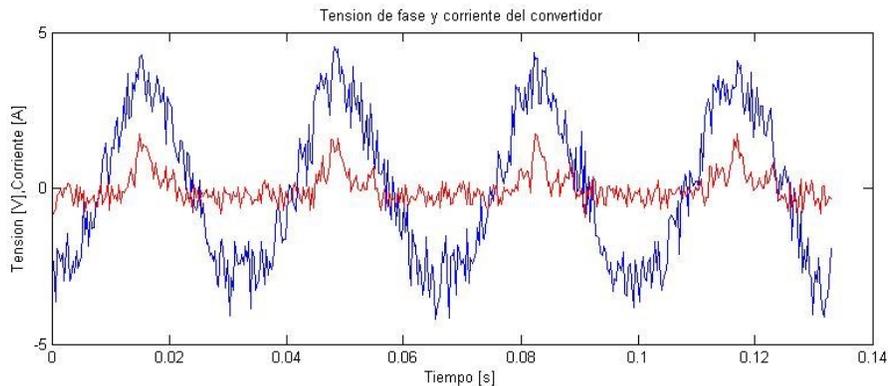


Figura 4.39 Ensayo con inyección a lazo abierto: Tension de fase y corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.40 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de tensión mostrada en azul en la Figura 4.38.

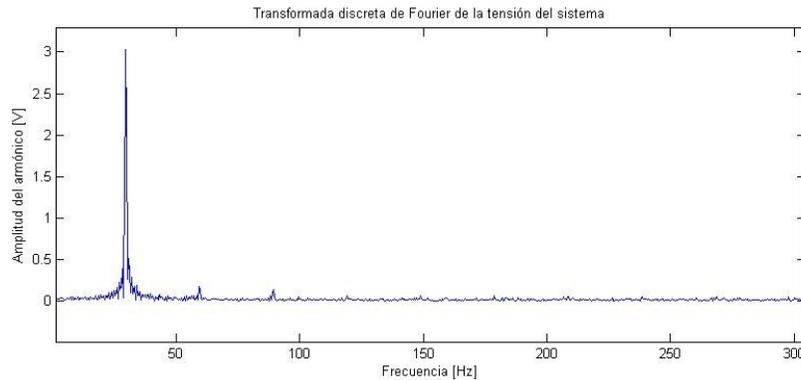


Figura 4.40 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de Fourier de la tensión del sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.41 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de corriente mostrada en verde en la Figura 4.38.

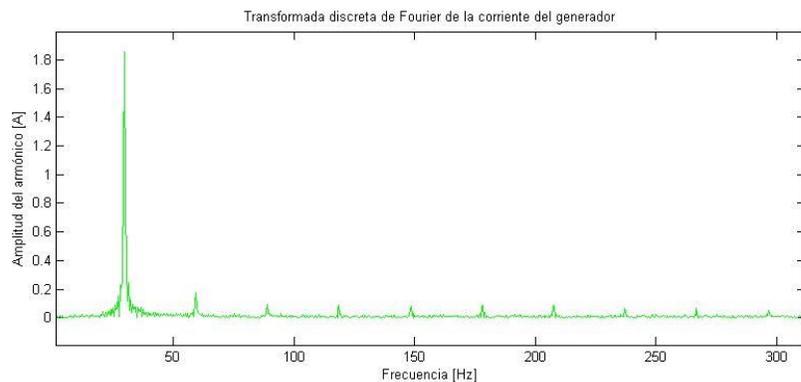


Figura 4.41 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.42 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de corriente mostrada en rojo en la Figura 4.39.

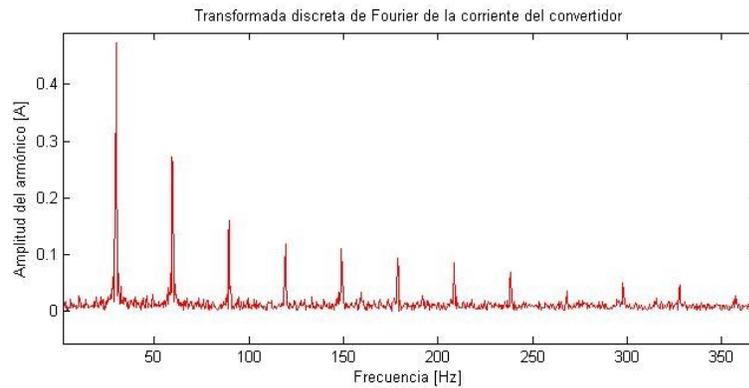


Figura 4.42 Ensayo con inyección a lazo abierto: Transformada discreta de fourier de la corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Se muestra en la Figura 4.43 la potencia activa (azul) y reactiva (verde) entregada por el generador medida a través del microcontrolador mediante el bloque calculador de potencia.

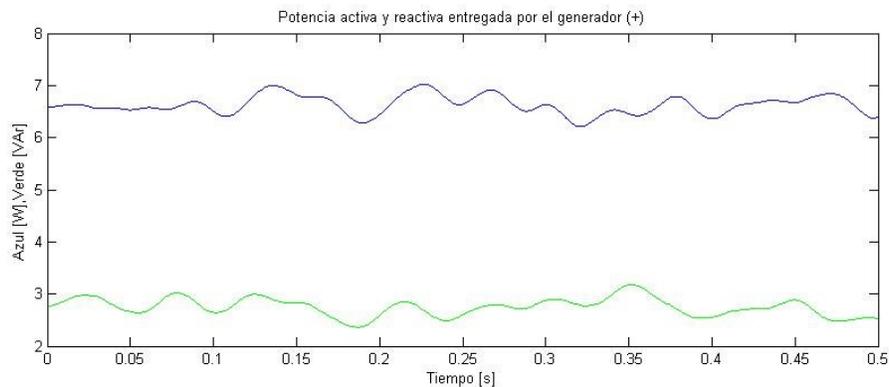


Figura 4.43 Ensayo con inyección a lazo abierto: Potencia activa y reactiva entregada por el generador (+)
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Se muestra en la Figura 4.44 la potencia activa (azul) y reactiva (verde) entregada por el equipo de inyección medida a través del microcontrolador mediante el bloque calculador de potencia.

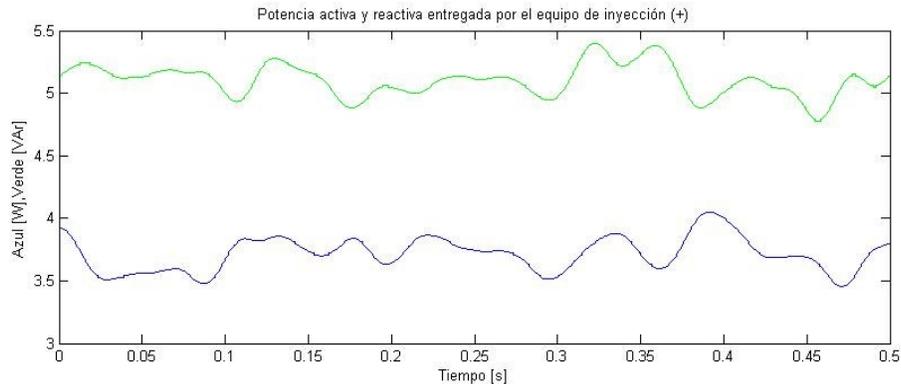


Figura 4.44 Ensayo con inyección a lazo abierto: Potencia activa y reactiva entregada por el equipo de inyección (+)
Fuente: Carvajal y D’Andrea

En la Tabla 4.8 se observan los resultados obtenidos de analizar las formas de onda de tensión y corriente del generador mostradas en la Figura 4.38 y corriente del equipo de inyección mostrada en la Figura 4.39 mediante transformada de Fourier. Con ello, fue posible el cálculo de la distorsión armónica total (THD) y de la potencia entregada por el generador y el equipo de inyección.

Tabla 4.8 Ensayo con inyección a lazo abierto: Cálculos de THD y potencia

| THD de la tensión de fase del sistema | THD de la corriente del generador | Potencia activa entregada por la red | Potencia reactiva entregada por la red |
|---------------------------------------|--|--|--|
| 0.06319599 | 0.57528097 | 5.156579069 | 6.65748336 |
| THD de la corriente del convertidor | Potencia activa entregada por el convertidor | Potencia reactiva entregada por el convertidor | |
| 2.49331881 | 2.279682148 | 0.26918736 | |

Fuente: Carvajal y D’Andrea

De la Tabla 4.8 se observa que el error entre la medición (Figura 4.43 y Figura 4.44) con el bloque calculador de potencia y la potencia calculada mediante el análisis de

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

Fourier ha aumentado significativamente, especialmente en el cálculo de las potencias reactivas. Durante este ensayo, el error mayor de las potencias activas fue de 1,7 W, mientras que de las potencias reactivas fue de 4 VAR.

Se observó que se duplicó el contenido armónico de la tensión y la corriente de la red, en comparación con los resultados del ensayo del sistema sin inyección (Tabla 4.7), con lo que se observa que la red se ve afectada considerablemente al conectar el sistema de inyección de energía a lazo abierto.

4.4.3 Sistema eléctrico con inyección de energía a lazo cerrado

Los últimos ensayos realizados fueron a lazo cerrado, de forma que, a través del bloque calculador, se realizó la medición de potencia y se comparó con la referencia para completar el ciclo de control.

El ensayo fue realizado bajo las referencias de 2 W y 2 VAR de potencia, de forma que los resultados esperados eran que las potencias calculadas entregadas por el equipo de inyección coincidieran con estos valores.

La Figura 4.45 muestra la tensión de la fase A de salida del autotransformador (azul), llamada tensión de fase del sistema, y la corriente de la fase A de salida del autotransformador (verde), que es la corriente que supe el generador.

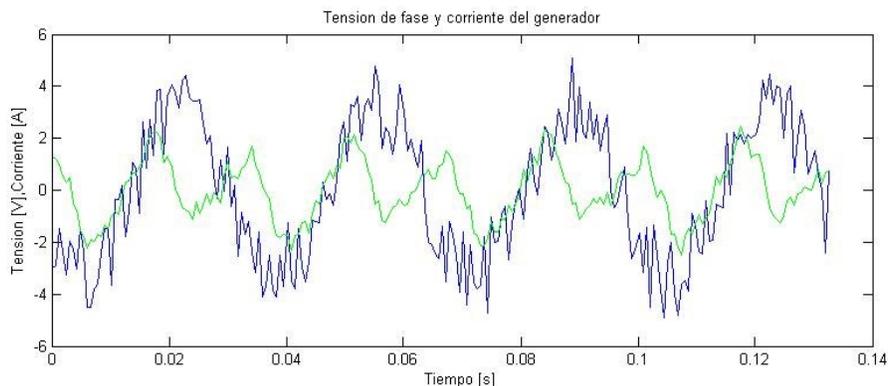


Figura 4.45 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Tension de fase y corriente del generador

Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.46 muestra la tensión de la fase A de salida del autotransformador (azul), y la corriente de la fase A de salida del equipo de inyección (rojo).

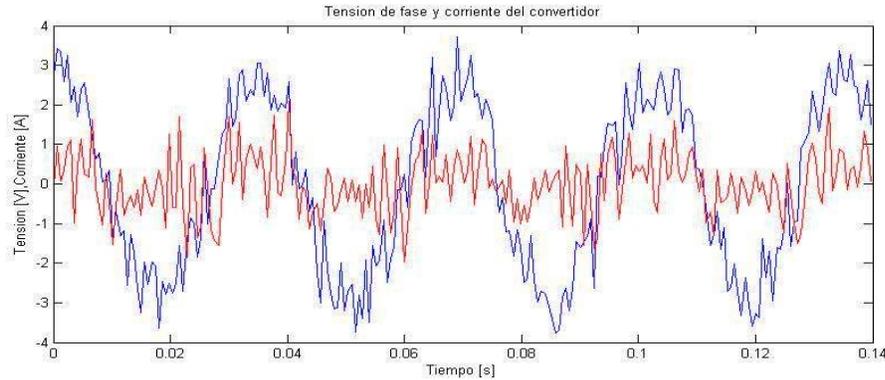


Figura 4.46 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Tension de fase y corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.47 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de tensión mostrada en azul en la Figura 4.45.

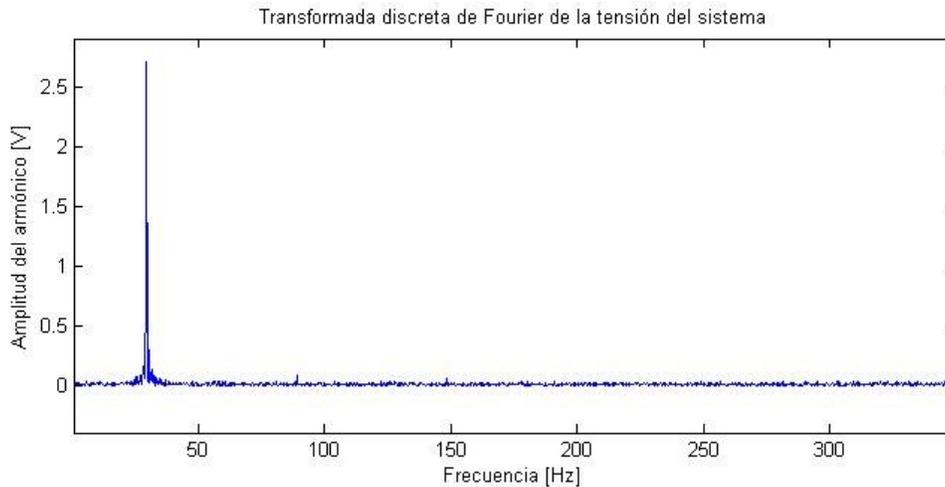


Figura 4.47 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la tension del sistema
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

La Figura 4.48 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de corriente mostrada en verde en la Figura 4.45. Como la frecuencia de trabajo del sistema es de 30 Hz, el resultado esperado era obtener magnitud de la fundamental en esta frecuencia, sin embargo, se observa que existe una componente casi de la misma magnitud en el segundo armónico (60 Hz).

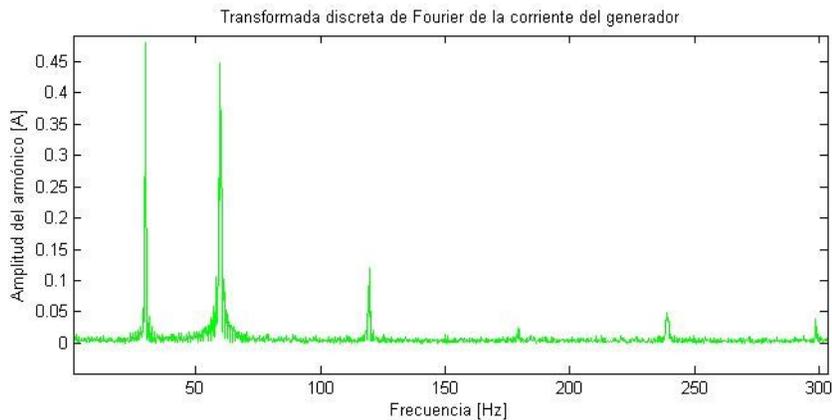


Figura 4.48 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la corriente del generador
Fuente: Carvajal y D'Andrea

La Figura 4.49 muestra la gráfica de amplitud correspondiente con la transformada de Fourier para la señal de corriente mostrada en rojo en la Figura 4.46.

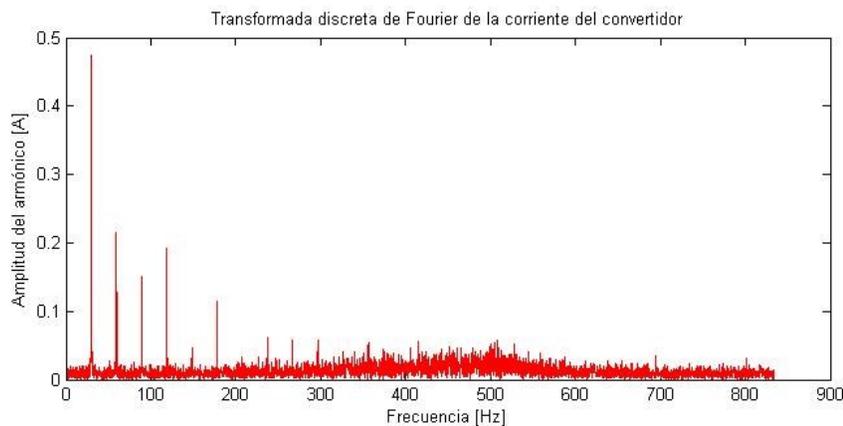


Figura 4.49 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Transformada discreta de Fourier de la corriente del convertidor
Fuente: Carvajal y D'Andrea

Se muestra en la Figura 4.50 la potencia activa (azul) y reactiva (verde) entregada por el equipo de inyección medida a través del microcontrolador mediante el bloque calculador de potencia.

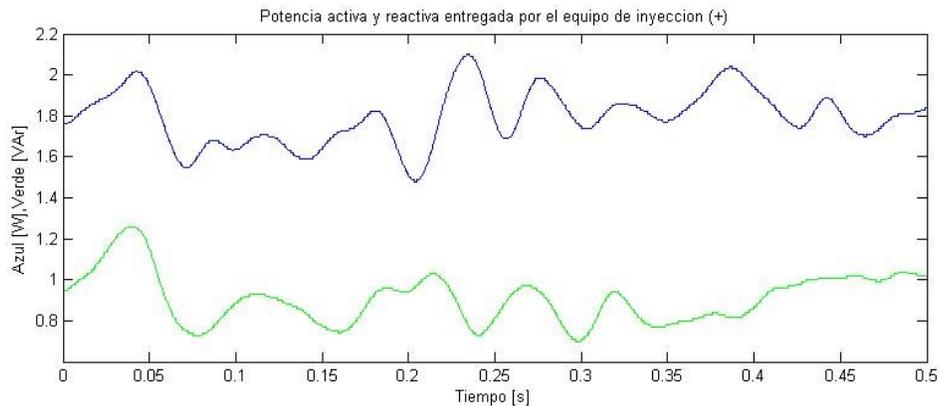


Figura 4.50 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Potencia activa y reactiva entregada por el equipo de inyección (+)
Fuente: Carvajal y D'Andrea

En la Tabla 4.9 se observan los resultados obtenidos de analizar las formas de onda de tensión y corriente del generador mostradas en la Figura 4.45 y corriente del equipo de inyección mostrada en la Figura 4.46 mediante transformada de Fourier. Con ello, fue posible el cálculo de la distorsión armónica total (THD) y de la potencia entregada por el generador y el equipo de inyección.

Tabla 4.9 Ensayo con inyección a lazo cerrado: Cálculos de THD y potencia

| THD de la tensión de fase del sistema | THD de la corriente del generador | Potencia activa entregada por la red | Potencia reactiva entregada por la red |
|---------------------------------------|--|--|--|
| 0.03350145 | 2.10665113 | 0.064152704 | 1.93137975 |
| THD de la corriente del convertidor | Potencia activa entregada por el convertidor | Potencia reactiva entregada por el convertidor | |
| 2.11103495 | 1.92553997 | 0.14474452 | |

Fuente: Carvajal y D'Andrea

Capítulo 4. Presentación y Análisis de Resultados.

En este caso, la potencia activa presentó un error de menos de 0,6 W, lo cual se observa al comparar la gráfica obtenida del bloque calculador de potencia (Figura 4.50) con el análisis de Fourier (Tabla 4.9). Sin embargo, el mayor error de cálculo en las potencias reactivas fue de 1 VAR.

La distorsión armónica de la red con inyección a lazo cerrado y con el sistema sin inyección son muy cercanas, sin embargo, existe una mayor distorsión de la corriente del generador, diez veces mayor que la del sistema sin inyección y cuatro veces mayor que el sistema en lazo abierto.

En la Figura 4.47 se observa que hubo una caída de tensión del primer armónico (30 Hz) de 0,5 V, y en la Figura 4.48 un decremento del primer armónico de la corriente de 1,2 A. Esto indica que la potencia en la carga no permaneció constante para este ensayo. Consecuente a esto, los cálculos de las potencias del generador también sufrieron un decremento igual de significativo.

Además, se observó que la corriente del convertidor (Figura 4.49) sufrió un aumento de su contenido armónico en frecuencias cercanas a 500 Hz, lo cual no se observó durante los ensayos a lazo abierto.

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo especial de grado se ha realizado la inyección de energía a un sistema eléctrico de corriente alterna utilizando convertidores electrónicos de potencia.

Se ha realizado la descripción del funcionamiento y análisis de los métodos de control de potencia, SRF y DPC, mediante el uso de simulaciones.

Referente a SRF, se consiguió que el esquema básico del método no controla las potencias de manera directa, la referencia a seguir por el sistema es de corrientes, pero existe una relación entre la potencia y las corrientes i_d e i_q que involucra al voltaje de línea. Si se llegase a tomar ventaja de esta proporción y entregar al sistema referencias de potencia, perturbaciones o variaciones de la tensión del sistema modificarían el cálculo de la referencia.

La frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos es constante, y se establece a través de la modulación PWM, mientras mayor sea la frecuencia de la señal moduladora, mejor se seguirá a la referencia de corriente.

Al ser constante la frecuencia de conmutación, se facilita la selección de los interruptores electrónicos y del filtro RL que funciona como impedancia del equipo de inyección de energía.

Para el funcionamiento de este método, es necesario realizar un seguimiento a todo momento de las tres tensiones de la red y las tres corrientes del equipo de inyección. En el caso de perder las tensiones, el sistema perdería el sincronismo con la red, y en el caso de perder las corrientes, el sistema no detecta que haya potencia entregada por el equipo de inyección y la orden del control al sistema sería seguir subiendo la inyección de energía.

El método DPC presume una ventaja sobre SRF al permitir controlar directamente los valores de potencia activa y reactiva en el sistema.

En este caso, la frecuencia de conmutación de los dispositivos depende del cálculo de la potencia del equipo de inyección y del ancho de la banda de histéresis, por lo que no es constante ni calculable de manera general. Esto presenta una dificultad al momento de seleccionar los interruptores electrónicos y la impedancia RL del equipo de inyección.

Es posible mejorar el seguimiento de la referencia, y con esto la forma de onda de las corrientes del convertidor, disminuyendo el ancho de la banda de histéresis, pero esto conlleva a un aumento en la frecuencia de conmutación lo cual produce mayor estrés sobre los interruptores electrónicos.

Para el funcionamiento de este método es necesario realizar un seguimiento de las dos tensiones de la red y dos corrientes del equipo de inyección. Esto supone una ventaja con respecto a SRF porque reduce el número de sensores. De igual manera, al perderse alguna de estas señales, se pierde sincronismo con el sistema (de ser tensiones) o el sistema entra en modo de inyección de energía indefinidamente (de ser corrientes).

Durante las simulaciones, se consiguió que el método DPC seguía mejor las referencias de potencia que el SRF, siendo el mayor error de DPC de un 3.19 % y el de SRF de un 7 %. También, el método SRF aumentó en mayor manera el contenido armónico de la red eléctrica, excepto para condiciones de referencia de potencia activa y reactiva nula, en los que DPC tuvo 3 veces el error de SRF. Además, se observó que ambos métodos presentaron tiempos de respuesta bastante similares, teniendo un promedio de 33 ms de tiempo de estabilización.

Se construyó un módulo experimental para la inyección de energía utilizando convertidores electrónicos de potencia y el método de control DPC, a una red eléctrica de corriente alterna en lazo abierto y lazo cerrado a partir del bus DC de 12 V.

Durante la ejecución de las pruebas de inyección, se tuvieron problemas de medición debido a que existía un error significativo para realizar el cálculo de potencias activa y reactiva debido a la magnitud tan pequeña de la corriente y de tensión del sistema. Como

dichas variables son de magnitud pequeña y tienen alto contenido armónico, el error en la medición es comparable con la magnitud de las variables.

Además, se consiguió que el bloque calculador de potencia perdía su exactitud a medida que el contenido armónico de la medición aumentaba, esto sucedió porque las ecuaciones usadas para este cálculo son aplicables a sistemas trifásicos equilibrados con tensiones y corrientes sinusoidales, y a mayor contenido armónico, más se alejó el sistema de esta condición.

Existió una disparidad entre las potencias de la red, del convertidor y de la carga, ya que la potencia de carga medida en los ensayos sin inyección, no coincide con la potencia de la carga durante los ensayos de inyección. Esto se debe a que el contenido armónico de la red durante los ensayos de inyección aumentó, y con esto, la potencia de la carga a su vez cambia. Por ser de naturaleza inductiva, a medida que aumenta la frecuencia, la impedancia de la carga aumenta.

Recomendaciones

Es posible la aplicación del método DPC con bloques estimadores de potencia en lugar de calculadores, que permiten prescindir del uso de dos sensores estimando potencia mediante los estados de conmutación del puente convertidor. Se recomienda ensayar este tipo de esquema y observar si representa una mejoría al sistema.

Teniendo en mente que la aplicación principal del equipo construido es para ser usado en industrias, se sugiere modificar los esquemas básicos de control SRF y DPC para que el sistema sea capaz de detectar si el voltaje del bus DC ha cambiado, para así tomar acciones sobre realizar o no la inyección de energía o si, en caso opuesto, absorber energía de la red para devolverle energía a la fuente DC. También, se podría monitorear la corriente de la carga, para que solo se inyecte energía después de haber superado un límite de potencia establecido.

Se sugiere aumentar la tensión del bus DC y la tensión de trabajo del sistema para obtener mediciones más confiables.

Se sugiere realizar ensayos midiendo también la corriente de la carga para analizar su contenido armónico y realizar un análisis más extenso de la situación.

Referencias

- [1] International Energy Agency, «Key World Energy Statistics,» 2012.
- [2] REUTERS, «REUTERS UK,» 9 Marzo 2010. [En línea]. Available: <http://uk.reuters.com/>. [Último acceso: 2 Marzo 2014].
- [3] avn, «Agencia Venezolana de Noticias,» 11 Febrero 2009. [En línea]. Available: <http://www.avn.info.ve/>. [Último acceso: 3 Marzo 2014].
- [4] ECOANALITICA, «Informe: El Fantasma de la Crisis Eléctrica Reaparece,» Caracas, 2011.
- [5] Centro Nacional de Gestión del Sistema Eléctrico, «Informe Anual,» Caracas, 2008.
- [6] «Bajón Eléctrico en 15 Estados por Fallas en Línea de Transmision,» *La Verdad*, 21 Abril 2012.
- [7] Oficina de Operación de Sistemas Interconectados OPSIS, «Informe Anual,» Caracas, 2012.
- [8] ENERDATA, «Energy Statistical Yearbook,» 2013.
- [9] Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, «Resolución 76,» 10 Junio 2011.
- [10] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Energy Management Agency, «Guía Básica de la Generación Distribuida,» Intelligent Energy, Madrid.
- [11] R. Muhammad H, *Power Electronics Handbook*, San Diego: Academic Press, 2001.
- [12] R. Muhammad H, *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, Prentice Hall.
- [13] D. W. Hart, *Electrónica de Potencia*, Madrid: Prentice Hall, 2001.
- [14] M. Malinowski y M. Kasmierkowski, *Control of Three-Phase PWM Rectifiers*, Warsaw, Poland: Warsaw University of Technology.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.

- [15] J. Eloy-García Carrasco, «Control Directo de Potencia de Convertidores Electrónicos Conectados a la Red,» Madrid, 2007.
- [16] C. Sabino, *Cómo Hacer una Tesis*, Caracas: Panapo, 1994.
- [17] M. Kazmierkowski, R. Krishnan y F. Blaabjerg, *Control in Power Electronics, Selected Problems*, New York: Academic, 2002.

Anexos

Anexo A Cambio de sistema de referencia

A.1. Transformada de Clarke: Representación vectorial de magnitudes físicas

El espacio temporal se puede representar mediante tres ejes ortogonales a , b , c . Cualquier magnitud trifásica se puede definir a través de sus coordenadas $x_a(t)$, $x_b(t)$, $x_c(t)$ sobre estos ejes, de modo que a cada valor de la variable t le corresponde un punto concreto, definiendo así un vector espacial $S(t)$ que tiene como origen el origen de coordenadas.

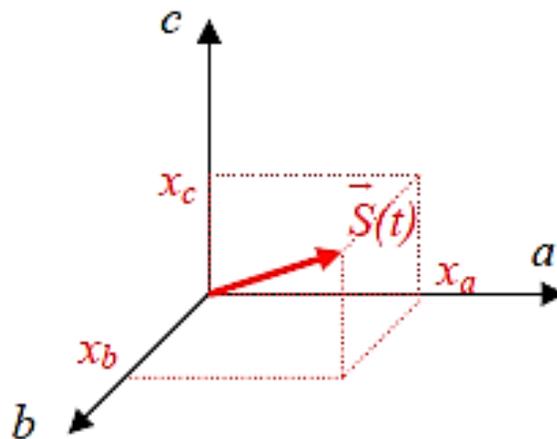


Figura A.1 Vector espacial $S(t)$ en el sistema de ejes (a,b,c).

Todo vector se puede descomponer como suma de vectores. Resulta útil descomponer el vector espacial $S(t)$ como suma de dos vectores perpendiculares, $S'(t)$ y $H(t)$, donde $H(t)$ es un vector formado por componentes homopolares $h(t)$ iguales.

$$S(t) = S'(t) + H(t), \quad \text{donde: } S'(t) = \begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ z'(t) \end{bmatrix}, \quad H(t) = \begin{bmatrix} h(t) \\ h(t) \\ h(t) \end{bmatrix} \quad \text{A. 1}$$

La componente homopolar $h(t)$ se define como:

$$h(t) = \frac{x(t) + y(t) + z(t)}{3} \quad \text{A. 2}$$

Estos dos vectores permiten definir una nueva base de coordenadas: La dirección $[1, 1, 1]^T$ en coordenadas a - b - c del vector $H(t)$ define el eje γ del nuevo sistema, mientras que el vector $S'(t)$, puesto que es perpendicular a $H(t)$, estará contenido un plano denominado π , perpendicular al eje γ y definido por los ejes α - β , siendo α la proyección del eje a en el plano π . La figura D.2 ilustra la descomposición del vector $S(t)$ en dos vectores $S'(t)$ y $H(t)$ perpendiculares y los nuevos ejes α - β - γ .

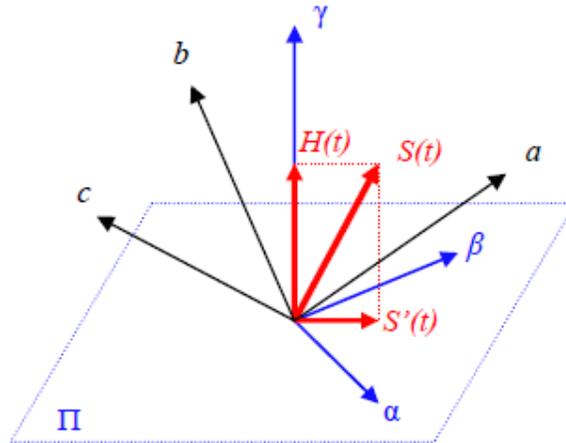


Figura A.2 Descomposición vectorial del vector $S(t)$

Si se considera un sistema trifásico simétrico y equilibrado, se puede demostrar que las corrientes y tensiones trifásicas del sistema se pueden representar mediante un vector espacial de módulo constante que gira a velocidad constante en el plano π . En primer lugar se define una tensión trifásica $v(t)$ cuyas componentes a , b , c son tensiones senoidales

simétricas y equilibradas, es decir, de igual módulo V_{max} y desfasadas 120° , tal y como muestra la ecuación (A. 3)

$$v(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{max} * \cos(\omega t) \\ V_{max} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{max} * \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \text{ donde } v_a + v_b + v_c = 0 \quad \text{A. 3}$$

Dado que el sistema es simétrico y equilibrado, la componente homopolar $h(t)$ es nula, lo cual implica que $H(t)=0$ y $S(t) = S'(t)$, es decir, que el vector espacial está contenido en el plano π .

Para deducir la trayectoria que describe el vector $v(t)$ en el plano es útil realizar un cambio de base de los ejes $a-b-c$ a los ejes $\alpha-\beta-\gamma$ mediante la aplicación de la matriz de cambio de base $[T]_{abc/\alpha\beta\gamma}$ definida en (A. 4).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} = [T]_{abc/\alpha\beta\gamma} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \text{ donde } T_{abc/\alpha\beta\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{A. 4}$$

$$\left\| T_{\frac{abc}{\alpha\beta\gamma}} \right\| = 1; T_{abc/\alpha\beta\gamma}^{-1} = T_{abc/\alpha\beta\gamma}^T$$

Sustituyendo en el sistema anterior las componentes de $v(t)$ por las expresiones dadas en (A.3) se puede determinar $v(t)$ en el nuevo sistema de coordenadas (A.5).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} = [T]_{abc/\alpha\beta\gamma} * \begin{bmatrix} V_{max} * \cos(\omega t) \\ V_{max} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{max} * \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \quad \text{A. 5}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{3}{2}} * V_{max} * \begin{bmatrix} V_{max} * \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{2} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{2} * \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ \sqrt{\frac{3}{2}} * V_{max} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \sqrt{\frac{3}{2}} * V_{max} * \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

A partir de este resultado se puede deducir que la tensión trifásica $v(t)$ sigue una trayectoria circular de radio $\rho = V_{max} * \sqrt{\frac{3}{2}}$ y velocidad angular constante ω sobre el plano π , tal y cómo muestra la Figura A.3.

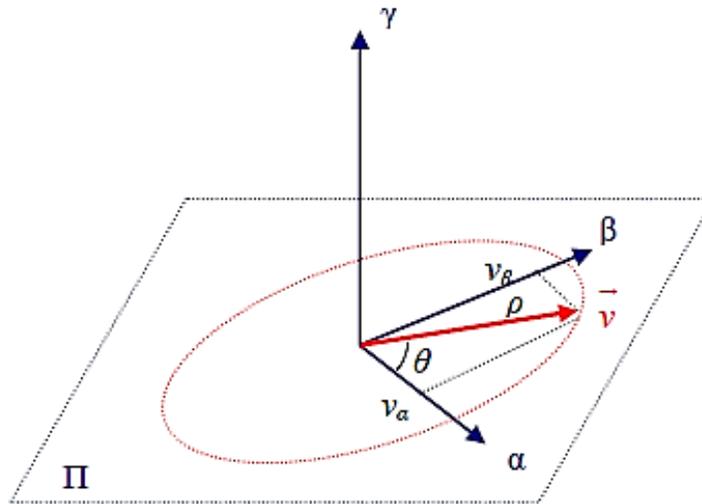


Figura A.3 Representación de la trayectoria del vector $v(t)$ sobre el plano π

En un sistema simétrico y equilibrado, este razonamiento es cierto tanto para tensiones simples y compuestas, como para corrientes. No obstante, si el sistema no es equilibrado, no se cumple la relación de desfase de 120° entre las componentes de las tensiones fase-neutro y las corrientes, por lo que las deducciones anteriores sólo serán válidas para tensiones compuestas.

A.2. Transformación de Park

Una vez hecho el cambio de base, las tensiones y corrientes del sistema girarán con velocidad angular constante ω sobre el plano π , definido por los ejes α - β . No obstante, lo que realmente interesa es que los vectores espaciales de tensión y corrientes permanezcan fijos en una determinada posición, de modo que en régimen permanente sea un vector constante. Esto se consigue definiendo un sistema de referencia que gire sobre el plano π a la misma velocidad ω que el vector espacial, de modo que el vector permanezca fijo en este nuevo sistema. La nueva base se define mediante dos ejes, d - q , que giran en el plano π en torno a un tercer eje, o , coincidente con el eje γ . La Figura A.4 muestra cómo se realiza el cambio de ejes sobre el plano π .

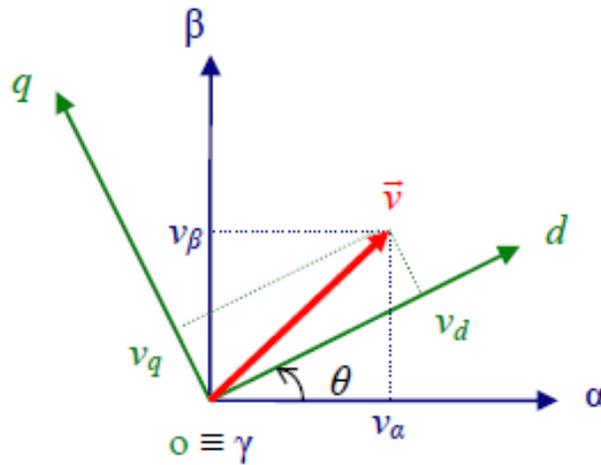


Figura A.4 Cambio de base entre los ejes α - β - γ a los nuevos ejes d - q - o .

A partir del ángulo θ de rotación de los ejes d - q , se puede definir la matriz $[T]_{\alpha\beta\gamma/dqo}$ que permite el cambio de base de α - β - γ a d - q - o , definido en (A. 6).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [T]_{\alpha\beta\gamma/dqo} * \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix}, \text{ donde } T_{\alpha\beta\gamma/dqo} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A. 6

$$\left\| T_{\alpha\beta\gamma/dqo} \right\| = 1; \quad T_{\alpha\beta\gamma/dqo}^{-1} = T_{\alpha\beta\gamma/dqo}^T$$

Finalmente, se ha conseguido cambiar el sistema de referencia del vector espacial desde el dominio temporal $a-b-c$, hasta el dominio de ejes giratorios $d-q$. Este cambio de ejes se conoce con el nombre de *transformación de Park*.

La transformada de Park es la matriz orto normal que combina las dos transformaciones anteriores (A. 4) y (A. 6) para permitir el cambio de base directo desde $a-b-c$ a $d-q-o$. La matriz T resultante, definida en (A. 7) es la matriz de transformación de Park.

$$T = T_{\frac{\alpha\beta\gamma}{dq0}} * T_{\frac{abc}{\alpha\beta\gamma}} = \sqrt{\frac{3}{2}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{A. 7}$$

$$T^{-1} = T^T;$$

$$[\]_{d-q-o} = T * [\]_{a-b-c}$$

Donde,

$$\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta_0 \quad : \text{Ángulo de rotación de los ejes } d-q.$$

$$\theta_0 = \theta(0) : \text{Ángulo inicial entre los ejes } d-q \text{ y el vector espacial de referencia.}$$

$$\omega = 2 * \pi * f : \text{Velocidad angular de los ejes } d-q.$$

En la nueva base los ejes $d-q$ giran sobre el plano π a la misma velocidad angular ω que el vector espacial v , tal y como muestra la figura A.5. Este vector espacial aparecía como rotante en la base $a-b-c$, pero al girar ahora a igual velocidad que los nuevos ejes, se transforma en un vector fijo en la base $d-q-o$.

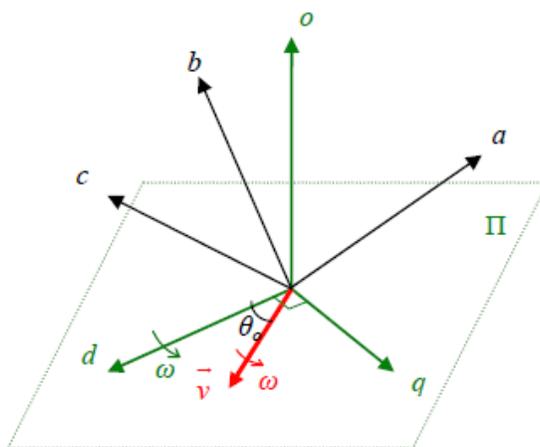


Figura A.5 Representación del vector espacial v en la nueva base $d-q-0$.

Anexo B Código de programación del microcontrolador

A continuación, se muestran los esquemas de simulink y los correspondientes códigos de programación mediante los cuales se programó el microcontrolador para lograr el control del sistema y la medición de las diferentes variables de interés.

B.1. Código de programación para control a lazo abierto

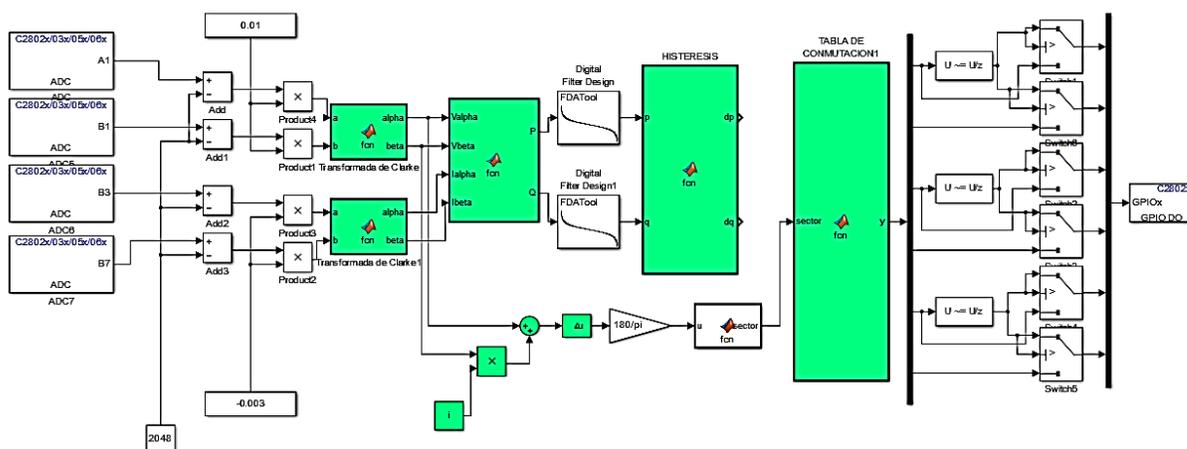


Figura A.6 Esquema de programación para el control a lazo abierto.

Anexos

```
/*
 * File: sequedaenmem4.c
 * Code generated for Simulink model 'sequedaenmem4'.
 * Model version          : 1.26
 * Simulink Coder version  : 8.6 (R2014a) 27-Dec-2013
 * C/C++ source code generated on : Thu Feb 12 22:14:58 2015
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */
#include "sequedaenmem4.h"
#include "sequedaenmem4_private.h"
/* Block signals (auto storage) */
B_sequedaenmem4_T sequedaenmem4_B;
/* Block states (auto storage) */
DW_sequedaenmem4_T sequedaenmem4_DW;
/* Real-time model */
RT_MODEL_sequedaenmem4_T sequedaenmem4_M_;
RT_MODEL_sequedaenmem4_T *const sequedaenmem4_M = &sequedaenmem4_M_;
real_T rt_atan2d_snf(real_T u0, real_T u1)
{
    real_T y;
    int16_T u0_0;
    int16_T u1_0;
    if (rtIsNaN(u0) || rtIsNaN(u1)) {
        y = (rtNaN);
    } else if (rtIsInf(u0) && rtIsInf(u1)) {
        if (u0 > 0.0) {
            u0_0 = 1;
        } else {
            u0_0 = -1;
        }
        if (u1 > 0.0) {
            u1_0 = 1;
        } else {
            u1_0 = -1;
        }
        y = atan2(u0_0, u1_0);
    } else if (u1 == 0.0) {
        if (u0 > 0.0) {
            y = RT_PI / 2.0;
        } else if (u0 < 0.0) {
            y = -(RT_PI / 2.0);
        }
    }
}
```

```

    } else {
        y = 0.0;
    }
} else {
    y = atan2(u0, u1);
}
return y;
}
/* Model step function */
void sequedaenmem4_step(void)
{
    static const int16_T e[45] = { 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1,
        1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0,
        0, 1, 1 };
    static const int16_T e2[45] = { 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0,
        0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1,
        1, 0, 0 };
    real_T rtb_Product4;
    int16_T rtb_Switch2;
    int16_T rtb_sector;
    int16_T rtb_y_idx_0;
    int16_T rtb_y_idx_2;
    int16_T rtb_y_idx_3;
    int16_T rtb_y_idx_4;
    int16_T rtb_y_idx_5;
    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
        sequedaenmem4_B.ADC = (AdcResult.ADCRESULT0);
    }
    /* Product: '<Root>/Product4' incorporates:
    * Constant: '<Root>/Constant'
    * Constant: '<Root>/Constant5'
    * Sum: '<Root>/Add'
    */
    rtb_Product4 = ((real_T)sequedaenmem4_B.ADC - sequedaenmem4_P.Constant_Value) *
        sequedaenmem4_P.Constant5_Value;
    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */

```

```

    sequedaenmem4_B.ADC5 = (AdcResult.ADCRESULT1);
}
/* Gain: '<Root>/Gain' incorporates:
 * ComplexToMagnitudeAngle: '<Root>/Complex to Magnitude-Angle'
 * Constant: '<Root>/Constant'
 * Constant: '<Root>/Constant2'
 * Constant: '<Root>/Constant5'
 * MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke'
 * Product: '<Root>/Product'
 * Product: '<Root>/Product1'
 * Sum: '<Root>/Add1'
 * Sum: '<Root>/Sum'
 */
/* MATLAB Function 'Transformada de Clarke': '<S6>:1' */
/* '<S6>:1:2' */
/* '<S6>:1:3' */
rtb_Product4 = rt_atan2d_snf((((real_T)sequedaenmem4_B.ADC5 -
sequedaenmem4_P.Constant_Value) * sequedaenmem4_P.Constant5_Value * 2.0 +
rtb_Product4) * 0.8660254037844386 * sequedaenmem4_P.Constant2_Value.im,
(((real_T)sequedaenmem4_B.ADC5 - sequedaenmem4_P.Constant_Value) *
sequedaenmem4_P.Constant5_Value * 2.0 + rtb_Product4) * 0.8660254037844386 *
sequedaenmem4_P.Constant2_Value.re + 1.5 * rtb_Product4) *
sequedaenmem4_P.Gain_Gain;
/* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function3' */
/* MATLAB Function 'MATLAB Function3': '<S4>:1' */
/* '<S4>:1:2' */
rtb_sector = 0;
if ((-30.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= 30.0)) {
    /* '<S4>:1:4' */
    /* '<S4>:1:5' */
    /* '<S4>:1:6' */
    rtb_sector = 6;
}
if ((30.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= 90.0)) {
    /* '<S4>:1:10' */
    /* '<S4>:1:11' */
    /* '<S4>:1:12' */
    rtb_sector = 1;
}
if ((90.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= 150.0)) {
    /* '<S4>:1:16' */
    /* '<S4>:1:17' */
    /* '<S4>:1:18' */
    rtb_sector = 2;
}

```

```

}
if ((150.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= 180.0)) {
    /* '<S4>:1:22' */
    /* '<S4>:1:23' */
    /* '<S4>:1:24' */
    rtb_sector = 3;
}
if ((-180.0 <= rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= -150.0)) {
    /* '<S4>:1:28' */
    /* '<S4>:1:29' */
    /* '<S4>:1:30' */
    rtb_sector = 3;
}
if ((-150.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= -90.0)) {
    /* '<S4>:1:34' */
    /* '<S4>:1:35' */
    /* '<S4>:1:36' */
    rtb_sector = 4;
}
if ((-90.0 < rtb_Product4) && (rtb_Product4 <= -30.0)) {
    /* '<S4>:1:40' */
    /* '<S4>:1:41' */
    /* '<S4>:1:42' */
    rtb_sector = 5;
}
/* End of MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function3' */
/* MATLAB Function: '<Root>/TABLA DE CONMUTACION1' */
/* MATLAB Function 'TABLA DE CONMUTACION1': '<S5>:1' */
/* '<S5>:1:3' */
/* '<S5>:1:4' */
/* '<S5>:1:11' */
/* '<S5>:1:12' */
rtb_y_idx_0 = e[rtb_sector + 1];
rtb_y_idx_2 = e[rtb_sector + 16];
rtb_y_idx_3 = e2[rtb_sector + 16];
rtb_y_idx_4 = e[rtb_sector + 31];
rtb_y_idx_5 = e2[rtb_sector + 31];
/* Switch: '<Root>/Switch1' incorporates:
 * MATLAB Function: '<Root>/TABLA DE CONMUTACION1'
 * RelationalOperator: '<S1>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch6'
 * UnitDelay: '<S1>/Delay Input1'
 */
if (e[rtb_sector + 1] != sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE) {

```

Anexos

```
    rtb_Product4 = 1.0;
    rtb_sector = 1;
} else {
    rtb_Product4 = e[rtb_sector + 1];
    rtb_sector = e2[rtb_sector + 1];
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch1' */
/* Switch: '<Root>/Switch2' incorporates:
 * RelationalOperator: '<S2>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch3'
 * UnitDelay: '<S2>/Delay Input1'
 */
if (rtb_y_idx_2 != sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_i) {
    rtb_Switch2 = 1;
    rtb_y_idx_3 = 1;
} else {
    rtb_Switch2 = rtb_y_idx_2;
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch2' */
/* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] = rtb_Product4;
sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] = rtb_sector;
sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] = rtb_Switch2;
sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] = rtb_y_idx_3;
/* Switch: '<Root>/Switch4' incorporates:
 * RelationalOperator: '<S3>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch5'
 * UnitDelay: '<S3>/Delay Input1'
 */
if (rtb_y_idx_4 != sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_c) {
    /* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
    sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] = 1.0;
    sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] = 1.0;
} else {
    /* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
    sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] = rtb_y_idx_4;
    sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] = rtb_y_idx_5;
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch4' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 =
        (sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO0 =
```

```

!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] != 0);
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 =
(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO1 =
!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] != 0);
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 =
(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 =
!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] != 0);
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 =
(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 =
!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] != 0);
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO6 =
(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO6 =
!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] != 0);
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO7 =
(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO7 =
!(sequedaenmem4_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] != 0);
}
/* Update for UnitDelay: '<S1>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE = rtb_y_idx_0;
/* Update for UnitDelay: '<S2>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_i = rtb_y_idx_2;
/* Update for UnitDelay: '<S3>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_c = rtb_y_idx_4;
}
/* Model initialize function */
void sequedaenmem4_initialize(void)
{
/* Registration code */
/* initialize non-finites */
rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));
/* initialize error status */
rtmSetErrorStatus(sequedaenmem4_M, (NULL));
/* block I/O */
(void) memset(((void *) &sequedaenmem4_B), 0,
sizeof(B_sequedaenmem4_T));
/* states (dwork) */
(void) memset((void *)&sequedaenmem4_DW, 0,
sizeof(DW_sequedaenmem4_T));
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */

```

Anexos

```
InitAdc();
config_ADC_SOC0 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
config_ADC_SOC1 ();
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294905600U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 207U;
EDIS;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE = sequedaenmem4_P.DetectChange_vinit;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S2>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_i = sequedaenmem4_P.DetectChange1_vinit;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S3>/Delay Input1' */
sequedaenmem4_DW.DelayInput1_DSTATE_c = sequedaenmem4_P.DetectChange2_vinit;
}
/* Model terminate function */
void sequedaenmem4_terminate(void)
{
/* (no terminate code required) */
}
/*
* File trailer for generated code.
* [EOF]
*/
```

B.2. Código de programación para control a lazo cerrado

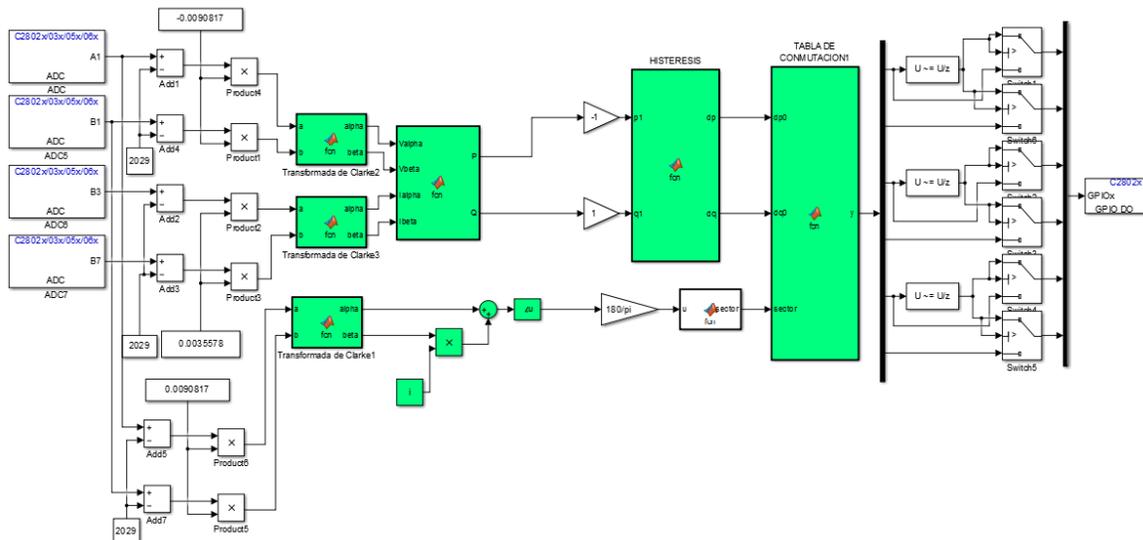


Figura A.7 Esquema de programación para el control a lazo cerrado.

```

/*
 * File: sequedaenmem11.c
 * Code generated for Simulink model 'sequedaenmem11'.
 * Model version          : 1.49
 * Simulink Coder version  : 8.6 (R2014a) 27-Dec-2013
 * C/C++ source code generated on : Sat Jan 31 12:05:19 2015
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */

#include "sequedaenmem11.h"
#include "sequedaenmem11_private.h"
/* Block signals (auto storage) */
B_sequedaenmem11_T sequedaenmem11_B;
/* Block states (auto storage) */
DW_sequedaenmem11_T sequedaenmem11_DW;
/* Real-time model */
RT_MODEL_sequedaenmem11_T sequedaenmem11_M_;
RT_MODEL_sequedaenmem11_T *const sequedaenmem11_M = &sequedaenmem11_M_;

/*
 * Output and update for atomic system:
 * '<Root>/Transformada de Clarke1'
 * '<Root>/Transformada de Clarke2'
 * '<Root>/Transformada de Clarke3'
 */
void sequedaen_TransformadadeClarke1(real_T rtu_a, real_T rtu_b,
  B_TransformadadeClarke1_seque_T *localB)
{
  /* MATLAB Function 'Transformada de Clarke1': '<S8>:1' */
  /* '<S8>:1:2' */
  localB->alpha = 1.5 * rtu_a;
  /* '<S8>:1:3' */
  localB->beta = (2.0 * rtu_b + rtu_a) * 0.8660254037844386;
}
real_T rt_atan2d_snf(real_T u0, real_T u1)
{
  real_T y;
  int16_T u0_0;
  int16_T u1_0;
  if (rtIsNaN(u0) || rtIsNaN(u1)) {
    y = (rtNaN);
  }
}

```

Anexos

```
} else if (rtIsInf(u0) && rtIsInf(u1)) {
  if (u0 > 0.0) {
    u0_0 = 1;
  } else {
    u0_0 = -1;
  }
  if (u1 > 0.0) {
    u1_0 = 1;
  } else {
    u1_0 = -1;
  }
  y = atan2(u0_0, u1_0);
} else if (u1 == 0.0) {
  if (u0 > 0.0) {
    y = RT_PI / 2.0;
  } else if (u0 < 0.0) {
    y = -(RT_PI / 2.0);
  } else {
    y = 0.0;
  }
} else {
  y = atan2(u0, u1);
}
return y;
}
/* Model step function */
void sequedaenmem11_step(void)
{
  /* local block i/o variables */
  real_T rtb_Product4;
  real_T rtb_Product1;
  real_T rtb_Product2;
  real_T rtb_Product3;
  real_T rtb_Product6;
  real_T rtb_Product5;
  static const int16_T e[45] = { 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1,
    1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0,
    0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1 };
  static const int16_T e2[45] = { 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0,
    0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1,
    1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0 };
  int16_T rtb_dp;
  int16_T rtb_y_idx_0;
  int16_T rtb_y_idx_2;
}
```

```

int16_T rtb_y_idx_3;
int16_T rtb_y_idx_4;
int16_T rtb_y_idx_5;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
{
  /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
  /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
  sequedaenmem11_B.ADC = (AdcResult.ADCRESULT0);
}
/* Product: '<Root>/Product4' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant5'
* Constant: '<Root>/Constant6'
* Sum: '<Root>/Add1'
*/
rtb_Product4 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC -
  sequedaenmem11_P.Constant6_Value) *
  sequedaenmem11_P.Constant5_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
{
  /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
  /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
  sequedaenmem11_B.ADC5 = (AdcResult.ADCRESULT1);
}
/* Product: '<Root>/Product1' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant5'
* Constant: '<Root>/Constant6'
* Sum: '<Root>/Add4'
*/
rtb_Product1 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC5 -
  sequedaenmem11_P.Constant6_Value) *
  sequedaenmem11_P.Constant5_Value;
/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke2' */
sequedaen_TransformadadeClarke1(rtb_Product4, rtb_Product1,
  &sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke2);
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
{
  /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
  /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
  sequedaenmem11_B.ADC6 = (AdcResult.ADCRESULT2);
}
/* Product: '<Root>/Product2' incorporates:

```

Anexos

```
* Constant: '<Root>/Constant'
* Constant: '<Root>/Constant1'
* Sum: '<Root>/Add2'
*/
rtb_Product2 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC6 -
                sequedaenmem11_P.Constant_Value) *
                sequedaenmem11_P.Constant1_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
    /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
    sequedaenmem11_B.ADC7 = (AdcResult.ADCRESULT3);
}
/* Product: '<Root>/Product3' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant'
* Constant: '<Root>/Constant1'
* Sum: '<Root>/Add3'
*/
rtb_Product3 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC7 -
                sequedaenmem11_P.Constant_Value) *
                sequedaenmem11_P.Constant1_Value;
/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke3' */
sequedaen_TransformadadeClarke1(rtb_Product2, rtb_Product3,
    &sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke3);
/* Gain: '<Root>/Gain1' incorporates:
* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function2'
*/
/* MATLAB Function 'MATLAB Function2': '<S5>:1' */
/* '<S5>:1:2' */
/* '<S5>:1:3' */
sequedaenmem11_B.Gain1 = (sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke2.alpha *
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke3.alpha +
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke2.beta *
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke3.beta) * 0.66666666666666663 *
    sequedaenmem11_P.Gain1_Gain;
/* Gain: '<Root>/Gain2' incorporates:
* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function2'
*/
sequedaenmem11_B.Gain2 = (sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke2.beta *
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke3.alpha -
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke2.alpha *
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke3.beta) * 0.66666666666666663 *
    sequedaenmem11_P.Gain2_Gain;
```

```

/* MATLAB Function: '<Root>/HISTERESIS' */
/* MATLAB Function 'HISTERESIS': '<S4>:1' */
/* '<S4>:1:2' */
rtb_dp = 0;
/* '<S4>:1:3' */
rtb_y_idx_3 = 0;
if (sequedaenmem11_B.Gain1 - 2.0 <= -0.001) {
/* '<S4>:1:7' */
/* '<S4>:1:8' */
rtb_dp = 1;
}
if (sequedaenmem11_B.Gain1 - 2.0 > -0.001) {
/* '<S4>:1:11' */
/* '<S4>:1:12' */
rtb_dp = 0;
}
if (sequedaenmem11_B.Gain2 - 2.0 <= -0.001) {
/* '<S4>:1:15' */
/* '<S4>:1:16' */
rtb_y_idx_3 = 1;
}
if (sequedaenmem11_B.Gain2 - 2.0 > -0.001) {
/* '<S4>:1:19' */
/* '<S4>:1:20' */
rtb_y_idx_3 = 0;
}
/* End of MATLAB Function: '<Root>/HISTERESIS' */
/* Product: '<Root>/Product6' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant3'
* Constant: '<Root>/Constant4'
* Sum: '<Root>/Add5'
*/
rtb_Product6 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC -
sequedaenmem11_P.Constant4_Value) *
sequedaenmem11_P.Constant3_Value;
/* Product: '<Root>/Product5' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant3'
* Constant: '<Root>/Constant4'
* Sum: '<Root>/Add7'
*/
rtb_Product5 = ((real_T)sequedaenmem11_B.ADC5 -
sequedaenmem11_P.Constant4_Value) *
sequedaenmem11_P.Constant3_Value;

```

```

/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke1' */
sequedaen_TransformadadeClarke1(rtb_Product6, rtb_Product5,
    &sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke1);
/* Gain: '<Root>/Gain' incorporates:
 * ComplexToMagnitudeAngle: '<Root>/Complex to Magnitude-Angle'
 * Constant: '<Root>/Constant2'
 * Product: '<Root>/Product'
 * Sum: '<Root>/Sum'
 */
sequedaenmem11_B.Gain1 = rt_atan2d_snf
    (sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke1.beta *
    sequedaenmem11_P.Constant2_Value.im,
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke1.beta *
    sequedaenmem11_P.Constant2_Value.re +
    sequedaenmem11_B.sf_TransformadadeClarke1.alpha) *
    sequedaenmem11_P.Gain_Gain;
/* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function3' */
/* MATLAB Function 'MATLAB Function3': '<S6>:1' */
/* '<S6>:1:2' */
sequedaenmem11_B.Gain2 = 0.0;
if ((-30.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= 30.0)) {
    /* '<S6>:1:4' */
    /* '<S6>:1:5' */
    /* '<S6>:1:6' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 6.0;
}
if ((30.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= 90.0)) {
    /* '<S6>:1:10' */
    /* '<S6>:1:11' */
    /* '<S6>:1:12' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 1.0;
}
if ((90.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= 150.0)) {
    /* '<S6>:1:16' */
    /* '<S6>:1:17' */
    /* '<S6>:1:18' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 2.0;
}
if ((150.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= 180.0)) {
    /* '<S6>:1:22' */
    /* '<S6>:1:23' */
    /* '<S6>:1:24' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 3.0;
}

```

```

if ((-180.0 <= sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= -150.0))
{
    /* '<S6>:1:28' */
    /* '<S6>:1:29' */
    /* '<S6>:1:30' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 3.0;
}
if ((-150.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= -90.0)) {
    /* '<S6>:1:34' */
    /* '<S6>:1:35' */
    /* '<S6>:1:36' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 4.0;
}
if ((-90.0 < sequedaenmem11_B.Gain1) && (sequedaenmem11_B.Gain1 <= -30.0)) {
    /* '<S6>:1:40' */
    /* '<S6>:1:41' */
    /* '<S6>:1:42' */
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 5.0;
}
/* End of MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function3' */
/* MATLAB Function: '<Root>/TABLA DE CONMUTACION1' */
/* MATLAB Function 'TABLA DE CONMUTACION1': '<S7>:1' */
/* '<S7>:1:3' */
/* '<S7>:1:4' */
/* '<S7>:1:7' */
sequedaenmem11_B.Gain1 = 2.0;
if (rtb_dp == 1) {
    /* '<S7>:1:11' */
    if (rtb_y_idx_3 == 1) {
        /* '<S7>:1:12' */
        /* '<S7>:1:13' */
        sequedaenmem11_B.Gain1 = sequedaenmem11_B.Gain2 + 5.0;
    }
    if (rtb_y_idx_3 == 0) {
        /* '<S7>:1:16' */
        /* '<S7>:1:17' */
        sequedaenmem11_B.Gain1 = sequedaenmem11_B.Gain2 + 3.0;
    }
}
if (rtb_dp == 0) {
    /* '<S7>:1:21' */
    if (rtb_y_idx_3 == 1) {
        /* '<S7>:1:22' */
        /* '<S7>:1:23' */

```

Anexos

```
    sequedaenmem11_B.Gain1 = sequedaenmem11_B.Gain2 + 1.0;
}
if (rtb_y_idx_3 == 0) {
    /* '<S7>:1:26' */
    /* '<S7>:1:27' */
    sequedaenmem11_B.Gain1 = sequedaenmem11_B.Gain2 + 2.0;
}
}
/* '<S7>:1:30' */
rtb_y_idx_0 = e[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 - 1];
rtb_dp = e2[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 - 1];
rtb_y_idx_2 = e[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 + 14];
rtb_y_idx_3 = e2[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 + 14];
rtb_y_idx_4 = e[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 + 29];
rtb_y_idx_5 = e2[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 + 29];
/* Switch: '<Root>/Switch1' incorporates:
 * MATLAB Function: '<Root>/TABLA DE CONMUTACION1'
 * RelationalOperator: '<S1>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch6'
 * UnitDelay: '<S1>/Delay Input1'
 */
if (e[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 - 1] !=
    sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE) {
    sequedaenmem11_B.Gain1 = 1.0;
    sequedaenmem11_B.Gain2 = 1.0;
} else {
    sequedaenmem11_B.Gain1 = e[(int16_T)sequedaenmem11_B.Gain1 - 1];
    sequedaenmem11_B.Gain2 = rtb_dp;
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch1' */
/* Switch: '<Root>/Switch2' incorporates:
 * RelationalOperator: '<S2>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch3'
 * UnitDelay: '<S2>/Delay Input1'
 */
if (rtb_y_idx_2 != sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_i) {
    rtb_dp = 1;
    rtb_y_idx_3 = 1;
} else {
    rtb_dp = rtb_y_idx_2;
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch2' */
/* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] = sequedaenmem11_B.Gain1;
```

```

sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] = sequedaenmem11_B.Gain2;
sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] = rtb_dp;
sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] = rtb_y_idx_3;
/* Switch: '<Root>/Switch4' incorporates:
 * RelationalOperator: '<S3>/FixPt Relational Operator'
 * Switch: '<Root>/Switch5'
 * UnitDelay: '<S3>/Delay Input1'
 */
if (rtb_y_idx_4 != sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_c) {
 /* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
 sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] = 1.0;
 sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] = 1.0;
} else {
 /* SignalConversion: '<Root>/TmpSignal ConversionAtDigital Output1Inport1' */
 sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] = rtb_y_idx_4;
 sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] = rtb_y_idx_5;
}
/* End of Switch: '<Root>/Switch4' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO0 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[0] != 0);
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO1 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[1] != 0);
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[2] != 0);
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[3] != 0);
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO6 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO6 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[4] != 0);
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO7 =
    (sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO7 =
    !(sequedaenmem11_B.TmpSignalConversionAtDigitalOut[5] != 0);
}

```

```
}
/* Update for UnitDelay: '<S1>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE = rtb_y_idx_0;
/* Update for UnitDelay: '<S2>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_i = rtb_y_idx_2;
/* Update for UnitDelay: '<S3>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_c = rtb_y_idx_4;
}
/* Model initialize function */
void sequedaenmem11_initialize(void)
{
/* Registration code */
/* initialize non-finites */
rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));
/* initialize error status */
rtmSetErrorStatus(sequedaenmem11_M, (NULL));
/* block I/O */
(void) memset(((void *) &sequedaenmem11_B), 0,
              sizeof(B_sequedaenmem11_T));
/* states (dwork) */
(void) memset((void *)&sequedaenmem11_DW, 0,
              sizeof(DW_sequedaenmem11_T));
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
InitAdc();
config_ADC_SOC0 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
config_ADC_SOC1 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
config_ADC_SOC2 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
config_ADC_SOC3 ();
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294905600U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 207U;
EDIS;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE = sequedaenmem11_P.DetectChange_vinit;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S2>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_i = sequedaenmem11_P.DetectChange1_vinit;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<S3>/Delay Input1' */
sequedaenmem11_DW.DelayInput1_DSTATE_c = sequedaenmem11_P.DetectChange2_vinit;
}
/* Model terminate function */
```

```

void sequedaenmem11_terminate(void)
{
  /* (no terminate code required) */
}
/*
 * File trailer for generated code.
 * [EOF]
 */

```

B.3. Código de programación para adquisición de señales y escritura a puerto

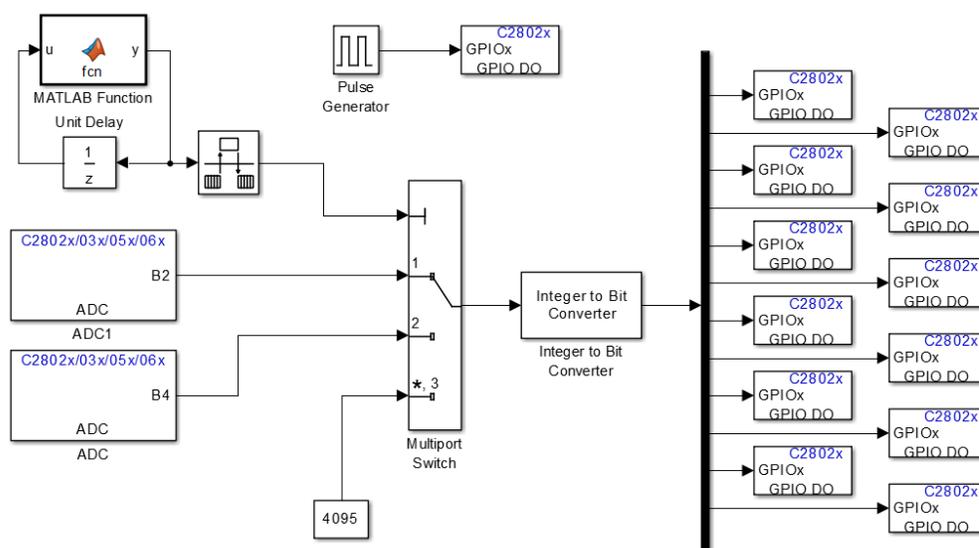


Figura A.8 Esquema de programación para la adquisición de señales.

```

/*
 * File: cinco.c
 * Code generated for Simulink model 'cinco'.
 * Model version      : 1.30
 * Simulink Coder version : 8.6 (R2014a) 27-Dec-2013
 * C/C++ source code generated on : Tue Jan 27 12:27:36 2015
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */
#include "cinco.h"
#include "cinco_private.h"

```

Anexos

```
/* Block signals (auto storage) */
B_cinco_T cinco_B;
/* Block states (auto storage) */
DW_cinco_T cinco_DW;
/* Real-time model */
RT_MODEL_cinco_T cinco_M_;
RT_MODEL_cinco_T *const cinco_M = &cinco_M_;
static void rate_monotonic_scheduler(void);
/*
 * Set which subrates need to run this base step (base rate always runs).
 * This function must be called prior to calling the model step function
 * in order to "remember" which rates need to run this base step. The
 * buffering of events allows for overlapping preemption.
 */
void cinco_SetEventsForThisBaseStep(boolean_T *eventFlags)
{
    /* Task runs when its counter is zero, computed via rtmStepTask macro */
    eventFlags[1] = ((boolean_T)rtmStepTask(cinco_M, 1));
}
/*
 * This function updates active task flag for each subrate
 * and rate transition flags for tasks that exchange data.
 * The function assumes rate-monotonic multitasking scheduler.
 * The function must be called at model base rate so that
 * the generated code self-manages all its subrates and rate
 * transition flags.
 */
static void rate_monotonic_scheduler(void)
{
    /* To ensure a deterministic data transfer between two rates,
     * data is transferred at the priority of a fast task and the frequency
     * of the slow task. The following flags indicate when the data transfer
     * happens. That is, a rate interaction flag is set true when both rates
     * will run, and false otherwise.
     */
    /* tid 0 shares data with slower tid rate: 1 */
    cinco_M->Timing.RateInteraction.TID0_1 = (cinco_M->Timing.TaskCounters.TID[1] ==
        0);
    /* Compute which subrates run during the next base time step. Subrates
     * are an integer multiple of the base rate counter. Therefore, the subtask
     * counter is reset when it reaches its limit (zero means run).
     */
    (cinco_M->Timing.TaskCounters.TID[1])++;
    if ((cinco_M->Timing.TaskCounters.TID[1]) > 1) { /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
```

```

    cinco_M->Timing.TaskCounters.TID[1] = 0;
}
}
/* Model step function for TID0 */
void cinco_step0(void) /* Sample time: [5.0E-5s, 0.0s] */
{
    int32_T bitIdx;
    uint32_T u;
    int16_T rtb_MultiportSwitch;
    { /* Sample time: [5.0E-5s, 0.0s] */
        rate_monotonic_scheduler();
    }
    /* RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
    if (cinco_M->Timing.RateInteraction.TID0_1) {
        cinco_B.RateTransition = cinco_DW.RateTransition_Buffer0;
    }
    /* End of RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC1' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
        cinco_B.ADC1 = (AdcResult.ADCRESULT1);
    }
    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
        cinco_B.ADC = (AdcResult.ADCRESULT0);
    }
    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC2' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
        cinco_B.ADC2 = (AdcResult.ADCRESULT2);
    }
    /* MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' */
    switch ((int16_T)cinco_B.RateTransition) {
    case 1:
        rtb_MultiportSwitch = cinco_B.ADC1;
        break;
    case 2:

```

Anexos

```
rtb_MultiportSwitch = cinco_B.ADC;
break;
default:
rtb_MultiportSwitch = cinco_B.ADC2;
break;
}
/* End of MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' */
/* S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* Integer to Bit Conversion */
bitIdx = 12L;
u = (uint32_T)rtb_MultiportSwitch;
for (rtb_MultiportSwitch = 0; rtb_MultiportSwitch < 12; rtb_MultiportSwitch++)
{
cinco_B.IntegertoBitConverter[bitIdx - 1L] = (uint16_T)((int16_T)u & 1);
u >>= 1;
bitIdx--;
}
/* End of S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
{
GpioDataRegs.GPBSET.bit.GPIO34 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
GpioDataRegs.GPCLEAR.bit.GPIO34 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO18 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO18 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO0 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
```

```

{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO7 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO7 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO5 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO5 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO1 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO19 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO19 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO6 = (cinco_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO6 = !(cinco_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
}
/* DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
cinco_B.PulseGenerator = (cinco_DW.clockTickCounter <
  cinco_P.PulseGenerator_Duty) && (cinco_DW.clockTickCounter >= 0L) ?
  cinco_P.PulseGenerator_Amp : 0.0;
if (cinco_DW.clockTickCounter >= cinco_P.PulseGenerator_Period - 1.0) {
  cinco_DW.clockTickCounter = 0L;
} else {
  cinco_DW.clockTickCounter++;
}
}
/* End of DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */

```

Anexos

```
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO29 = (cinco_B.PulseGenerator != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO29 = !(cinco_B.PulseGenerator != 0);
}
}
/* Model step function for TID1 */
void cinco_step1(void) /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
{
    real_T rtb_y;
    /* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' incorporates:
    * UnitDelay: '<Root>/Unit Delay'
    */
    /* MATLAB Function 'MATLAB Function': '<S1>:1' */
    /* '<S1>:1:4' */
    rtb_y = 0.0;
    if (cinco_DW.UnitDelay_DSTATE < 3.0) {
        /* '<S1>:1:6' */
        /* '<S1>:1:7' */
        rtb_y = cinco_DW.UnitDelay_DSTATE + 1.0;
    }
    if (cinco_DW.UnitDelay_DSTATE >= 3.0) {
        /* '<S1>:1:10' */
        /* '<S1>:1:11' */
        rtb_y = 1.0;
    }
    /* End of MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' */
    /* Update for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
    cinco_DW.RateTransition_Buffer0 = rtb_y;
    /* Update for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
    cinco_DW.UnitDelay_DSTATE = rtb_y;
}

/* Model initialize function */
void cinco_initialize(void)
{
    /* Registration code */
    /* initialize real-time model */
    (void) memset((void *)cinco_M, 0,
        sizeof(RT_MODEL_cinco_T));
    /* block I/O */
    (void) memset(((void *) &cinco_B), 0,
        sizeof(B_cinco_T));
    /* states (dwork) */
```

```

(void) memset((void *)&cinco_DW, 0,
              sizeof(DW_cinco_T));
/* Start for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
cinco_B.RateTransition = cinco_P.RateTransition_X0;
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC1' */
InitAdc();
config_ADC_SOC1 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
config_ADC_SOC0 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC2' */
config_ADC_SOC2 ();
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.all |= 4U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 262144U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294966527U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 16U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967292U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 1U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294918143U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 128U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294964223U;

```

Anexos

```
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 32U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 8U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967283U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 2U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 524288U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4244635647U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4096U;
EDIS;

/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294955007U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 64U;
EDIS;
/* Start for DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
cinco_DW.clockTickCounter = 0L;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4093640703U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 536870912U;
EDIS;
/* InitializeConditions for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
cinco_DW.RateTransition_Buffer0 = cinco_P.RateTransition_X0;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
cinco_DW.UnitDelay_DSTATE = cinco_P.UnitDelay_InitialCondition;
}
/* Model terminate function */
void cinco_terminate(void)
{
    /* (no terminate code required) */
}
```

```

}
/*
 * File trailer for generated code.
 * [EOF]
 */

```

B.4. Código de programación para el cálculo y escritura a puerto de la potencia del generador

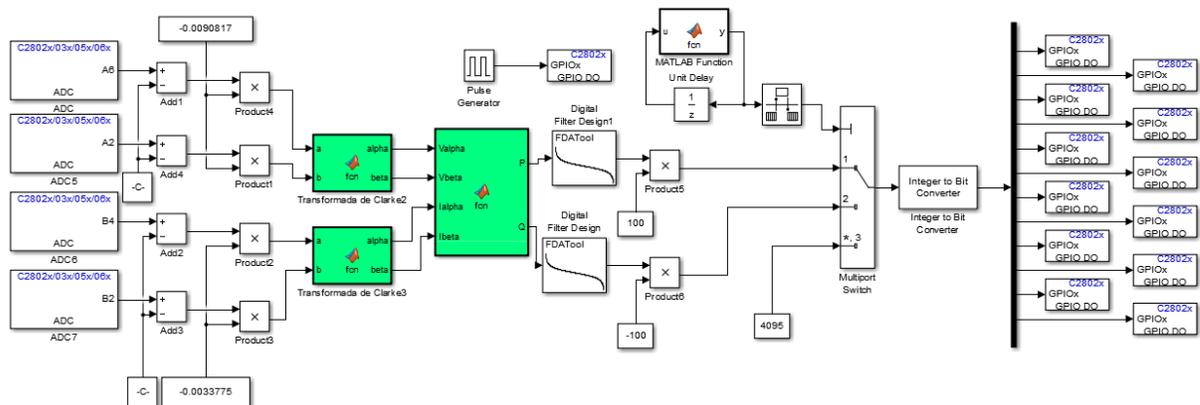


Figura A.9 Esquema de programación para el cálculo de potencia del generador.

```

/*
 * File: POTENCIAdelGENERADOR.c
 * Code generated for Simulink model 'POTENCIAdelGENERADOR'.
 * Model version          : 1.53
 * Simulink Coder version : 8.6 (R2014a) 27-Dec-2013
 * C/C++ source code generated on : Sat Jan 31 12:14:38 2015
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */
#include "POTENCIAdelGENERADOR.h"
#include "POTENCIAdelGENERADOR_private.h"
/* Block signals (auto storage) */
B_POTENCIAdelGENERADOR_T POTENCIAdelGENERADOR_B;
/* Block states (auto storage) */
DW_POTENCIAdelGENERADOR_T POTENCIAdelGENERADOR_DW;
/* Real-time model */
RT_MODEL_POTENCIAdelGENERADOR_T POTENCIAdelGENERADOR_M_;
RT_MODEL_POTENCIAdelGENERADOR_T *const POTENCIAdelGENERADOR_M =
    &POTENCIAdelGENERADOR_M_;

```

Anexos

```
static void rate_monotonic_scheduler(void);
/*
 * Set which subrates need to run this base step (base rate always runs).
 * This function must be called prior to calling the model step function
 * in order to "remember" which rates need to run this base step. The
 * buffering of events allows for overlapping preemption.
 */
void POTENCIAdelGENERADOR_SetEventsForThisBaseStep(boolean_T *eventFlags)
{
    /* Task runs when its counter is zero, computed via rtmStepTask macro */
    eventFlags[1] = ((boolean_T)rtmStepTask(POTENCIAdelGENERADOR_M, 1));
}
/*
 * This function updates active task flag for each subrate
 * and rate transition flags for tasks that exchange data.
 * The function assumes rate-monotonic multitasking scheduler.
 * The function must be called at model base rate so that
 * the generated code self-manages all its subrates and rate
 * transition flags.
 */
static void rate_monotonic_scheduler(void)
{
    /* To ensure a deterministic data transfer between two rates,
     * data is transferred at the priority of a fast task and the frequency
     * of the slow task. The following flags indicate when the data transfer
     * happens. That is, a rate interaction flag is set true when both rates
     * will run, and false otherwise.
     */
    /* tid 0 shares data with slower tid rate: 1 */
    POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.RateInteraction.TIDO_1 =
        (POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1] == 0);
    /* Compute which subrates run during the next base time step. Subrates
     * are an integer multiple of the base rate counter. Therefore, the subtask
     * counter is reset when it reaches its limit (zero means run).
     */
    (POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1])++;
    if ((POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1]) > 1) /* Sample time: [0.0002s,
    0.0s] */
        POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1] = 0;
}
}
/* Model step function for TID0 */
void POTENCIAdelGENERADOR_step0(void) /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
{
```

```

int16_T k;
int32_T bitIdx;
uint32_T u;
real_T rtb_Product4;
real_T rtb_alpha_i;
real_T rtb_beta_b;
real_T rtb_alpha;
real_T rtb_P;
{
    /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
    rate_monotonic_scheduler();
}
/* RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
if (POTENCIAdelGENERADOR_M->Timing.RateInteraction.TIDO_1) {
    POTENCIAdelGENERADOR_B.RateTransition =
        POTENCIAdelGENERADOR_DW.RateTransition_Buffer0;
}
/* End of RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
    /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
    POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC = (AdcResult.ADCRESULT0);
}
/* Product: '<Root>/Product4' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant5'
* Constant: '<Root>/Constant6'
* Sum: '<Root>/Add1'
*/
rtb_Product4 = ((real_T)POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC -
    POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant6_Value) *
    POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant5_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
    /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
    POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC5 = (AdcResult.ADCRESULT1);
}
/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke2' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant5'
* Constant: '<Root>/Constant6'
* Product: '<Root>/Product1'
* Sum: '<Root>/Add4'

```

Anexos

```
*/
/* MATLAB Function 'Transformada de Clarke2': '<S5>:1' */
/* '<S5>:1:2' */
rtb_alpha_i = 1.5 * rtb_Product4;
/* '<S5>:1:3' */
rtb_beta_b = (((real_T)POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC5 -
               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant6_Value) *
               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant5_Value * 2.0 + rtb_Product4) *
               0.8660254037844386;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
{
  /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
  /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
  POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC6 = (AdcResult.ADCRESULT2);
}
/* Product: '<Root>/Product2' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant'
* Constant: '<Root>/Constant1'
* Sum: '<Root>/Add2'
*/
rtb_Product4 = ((real_T)POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC6 -
               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant_Value) *
               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant1_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
{
  /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
  /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
  POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC7 = (AdcResult.ADCRESULT3);
}
/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke3' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant'
* Constant: '<Root>/Constant1'
* Product: '<Root>/Product3'
* Sum: '<Root>/Add3'
*/
/* MATLAB Function 'Transformada de Clarke3': '<S6>:1' */
/* '<S6>:1:2' */
rtb_alpha = 1.5 * rtb_Product4;
/* '<S6>:1:3' */
rtb_Product4 = (rtb_Product4 - ((real_T)POTENCIAdelGENERADOR_B.ADC7 -
                               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant_Value) *
                               POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant1_Value * 2.0) *
```

```

0.8660254037844386;
/* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function2' */
/* MATLAB Function 'MATLAB Function2': '<S4>:1' */
/* '<S4>:1:2' */
rtb_P = (rtb_alpha_i * rtb_alpha + rtb_beta_b * rtb_Product4) *
0.66666666666666663;
/* '<S4>:1:3' */
rtb_Product4 = (rtb_beta_b * rtb_alpha - rtb_alpha_i * rtb_Product4) *
0.66666666666666663;
/* S-Function (sdsqbiquad): '<S2>/Digital Filter' */
rtb_beta_b = (9.8458979119984636E-6 * rtb_P - -1.9951632412838627 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[0L]) -
0.99520262487551059 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[1L];
rtb_alpha = (2.0 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[0L] +
rtb_beta_b) + POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES
[1L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[1L] =
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[0L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[0L] = rtb_beta_b;
rtb_beta_b = (9.8126110186609252E-6 * rtb_alpha - -1.9884180173746586 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[2L]) -
0.98845726781873322 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[3L];
POTENCIAdelGENERADOR_B.DigitalFilter = (2.0 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[2L] + rtb_beta_b) +
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[3L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[3L] =
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[2L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES[2L] = rtb_beta_b;
/* S-Function (sdsqbiquad): '<S1>/Digital Filter' */
rtb_beta_b = (9.8458979119984636E-6 * rtb_Product4 - -1.9951632412838627 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L]) -
0.99520262487551059 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[1L];
rtb_alpha = (2.0 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L] +
rtb_beta_b) +
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[1L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[1L] =
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L] = rtb_beta_b;
rtb_beta_b = (9.8126110186609252E-6 * rtb_alpha - -1.9884180173746586 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L]) -
0.98845726781873322 * POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[3L];
POTENCIAdelGENERADOR_B.DigitalFilter_n = (2.0 *
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L] + rtb_beta_b) +
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[3L];

```

Anexos

```
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[3L] =
  POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L];
POTENCIAdelGENERADOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L] = rtb_beta_b;
/* MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant2'
 * Constant: '<Root>/Constant3'
 * Constant: '<Root>/Constant4'
 * Product: '<Root>/Product5'
 * Product: '<Root>/Product6'
 */
switch ((int16_T)POTENCIAdelGENERADOR_B.RateTransition) {
case 1:
  rtb_Product4 = POTENCIAdelGENERADOR_B.DigitalFilter *
    POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant2_Value;
  break;
case 2:
  rtb_Product4 = POTENCIAdelGENERADOR_B.DigitalFilter_n *
    POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant4_Value;
  break;
default:
  rtb_Product4 = POTENCIAdelGENERADOR_P.Constant3_Value;
  break;
}
/* End of MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' */
/* S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* Integer to Bit Conversion */
bitIdx = 12L;
u = (uint32_T)rtb_Product4;
for (k = 0; k < 12; k++) {
  POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[bitIdx - 1L] = (int16_T)u & 1;
  u >>= 1;
  bitIdx--;
}
/* End of S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
{
  GpioDataRegs.GPBSET.bit.GPIO34 =
    (POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
  GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO34 =
    !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO18 =
```

```

(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO18 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO0 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO7 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO7 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
}

/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO5 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO5 =
!(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 =
(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);

```

Anexos

```
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 =
    !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 =
        (POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO1 =
        !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO19 =
        (POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO19 =
        !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12 =
        (POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12 =
        !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO6 =
        (POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO6 =
        !(POTENCIAdelGENERADOR_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
}
/* DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
POTENCIAdelGENERADOR_B.PulseGenerator =
    (POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter <
        POTENCIAdelGENERADOR_P.PulseGenerator_Duty) &&
    (POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter >= 0L) ?
    POTENCIAdelGENERADOR_P.PulseGenerator_Amp : 0.0;
if (POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter >=
    POTENCIAdelGENERADOR_P.PulseGenerator_Period - 1.0) {
    POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter = 0L;
} else {
    POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter++;
}
}
/* End of DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
```

```

/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
{
  GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO29 = (POTENCIAdelGENERADOR_B.PulseGenerator != 0);
  GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO29 = !(POTENCIAdelGENERADOR_B.PulseGenerator
    != 0);
}
}
/* Model step function for TID1 */
void POTENCIAdelGENERADOR_step1(void) /* Sample time: [0.0002s, 0.0s] */
{
  real_T rtb_y;
  /* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' incorporates:
   * UnitDelay: '<Root>/Unit Delay'
   */
  /* MATLAB Function 'MATLAB Function': '<S3>:1' */
  /* '<S3>:1:4' */
  rtb_y = 0.0;
  if (POTENCIAdelGENERADOR_DW.UnitDelay_DSTATE < 3.0) {
    /* '<S3>:1:6' */
    /* '<S3>:1:7' */
    rtb_y = POTENCIAdelGENERADOR_DW.UnitDelay_DSTATE + 1.0;
  }
  if (POTENCIAdelGENERADOR_DW.UnitDelay_DSTATE >= 3.0) {
    /* '<S3>:1:10' */
    /* '<S3>:1:11' */
    rtb_y = 1.0;
  }
}
/* End of MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' */
/* Update for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
POTENCIAdelGENERADOR_DW.RateTransition_Buffer0 = rtb_y;
/* Update for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
POTENCIAdelGENERADOR_DW.UnitDelay_DSTATE = rtb_y;
}
/* Model initialize function */
void POTENCIAdelGENERADOR_initialize(void)
{
  /* Registration code */
  /* initialize real-time model */
  (void) memset((void *)POTENCIAdelGENERADOR_M, 0,
    sizeof(RT_MODEL_POTENCIAdelGENERADOR_T));
  /* block I/O */
  (void) memset(((void *) &POTENCIAdelGENERADOR_B), 0,
    sizeof(B_POTENCIAdelGENERADOR_T));
  /* states (dwork) */
}

```

Anexos

```
(void) memset((void *)&POTENCIAdelGENERADOR_DW, 0,
              sizeof(DW_POTENCIAdelGENERADOR_T));
/* Start for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
POTENCIAdelGENERADOR_B.RateTransition =
  POTENCIAdelGENERADOR_P.RateTransition_X0;
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
InitAdc();
config_ADC_SOC0 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
config_ADC_SOC1 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
config_ADC_SOC2 ();
/* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
config_ADC_SOC3 ();
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.all |= 4U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 262144U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294966527U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 16U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967292U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 1U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294918143U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 128U;
EDIS;
```

```

/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294964223U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 32U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 8U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967283U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 2U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 524288U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4244635647U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4096U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294955007U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 64U;
EDIS;
/* Start for DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
POTENCIAdelGENERADOR_DW.clockTickCounter = 0L;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4093640703U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 536870912U;
EDIS;
/* InitializeConditions for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
POTENCIAdelGENERADOR_DW.RateTransition_Buffer0 =
    POTENCIAdelGENERADOR_P.RateTransition_X0;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
POTENCIAdelGENERADOR_DW.UnitDelay_DSTATE =
    POTENCIAdelGENERADOR_P.UnitDelay_InitialCondition;
}

```

```

/* Model terminate function */
void POTENCIAdelGENERADOR_terminate(void)
{
    /* (no terminate code required) */
}
/*
 * File trailer for generated code
 * [EOF]
 */

```

B.5. Código de programación para el cálculo y escritura a puerto de la potencia del convertidor

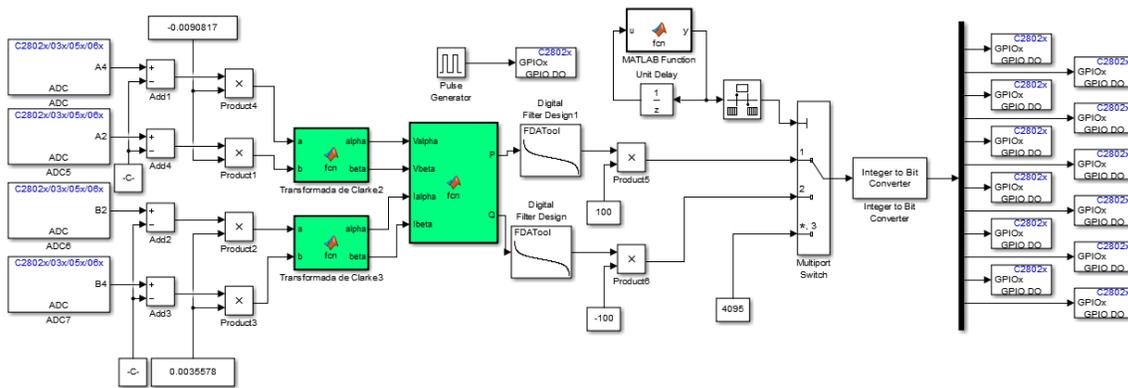


Figura A.10 Esquema de programación para el cálculo de potencia del convertidor.

```

/*
 * File: POTENCIAdelCONVERTIDOR.c
 * Code generated for Simulink model 'POTENCIAdelCONVERTIDOR'.
 * Model version          : 1.52
 * Simulink Coder version : 8.6 (R2014a) 27-Dec-2013
 * C/C++ source code generated on : Sat Jan 31 11:48:12 2015
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */
#include "POTENCIAdelCONVERTIDOR.h"
#include "POTENCIAdelCONVERTIDOR_private.h"
/* Block signals (auto storage) */
B_POTENCIAdelCONVERTIDOR_T POTENCIAdelCONVERTIDOR_B;
/* Block states (auto storage) */
DW_POTENCIAdelCONVERTIDOR_T POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW;
/* Real-time model */

```

```

RT_MODEL_POTENCIAdelCONVERTID_T POTENCIAdelCONVERTIDOR_M_;
RT_MODEL_POTENCIAdelCONVERTID_T *const POTENCIAdelCONVERTIDOR_M =
    &POTENCIAdelCONVERTIDOR_M_;
static void rate_monotonic_scheduler(void);
/*
 * Set which subrates need to run this base step (base rate always runs).
 * This function must be called prior to calling the model step function
 * in order to "remember" which rates need to run this base step. The
 * buffering of events allows for overlapping preemption.
 */
void POTENCIAdelCONVERTIDOR_SetEventsForThisBaseStep(boolean_T *eventFlags)
{
    /* Task runs when its counter is zero, computed via rtmStepTask macro */
    eventFlags[1] = ((boolean_T)rtmStepTask(POTENCIAdelCONVERTIDOR_M, 1));
}
/*
 * This function updates active task flag for each subrate
 * and rate transition flags for tasks that exchange data.
 * The function assumes rate-monotonic multitasking scheduler.
 * The function must be called at model base rate so that
 * the generated code self-manages all its subrates and rate
 * transition flags.
 */
static void rate_monotonic_scheduler(void)
{
    /* To ensure a deterministic data transfer between two rates,
     * data is transferred at the priority of a fast task and the frequency
     * of the slow task. The following flags indicate when the data transfer
     * happens. That is, a rate interaction flag is set true when both rates
     * will run, and false otherwise.
     */
    /* tid 0 shares data with slower tid rate: 1 */
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.RateInteraction.TID0_1 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1] == 0);
    /* Compute which subrates run during the next base time step. Subrates
     * are an integer multiple of the base rate counter. Therefore, the subtask
     * counter is reset when it reaches its limit (zero means run).
     */
    (POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1])++;
    if ((POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1]) > 1) { /* Sample time:
    [0.0002s, 0.0s] */
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.TaskCounters.TID[1] = 0;
    }
}
}

```

Anexos

```
/*
 * Output and update for atomic system:
 * '<Root>/Transformada de Clarke2'
 * '<Root>/Transformada de Clarke3'
 */
void POTEN_TransformadadeClarke2(real_T rtu_a, real_T rtu_b,
    B_TransformadadeClarke2_POTEN_T *localB)
{
    /* MATLAB Function 'Transformada de Clarke2': '<S5>:1' */
    /* '<S5>:1:2' */
    localB->alpha = 1.5 * rtu_a;
    /* '<S5>:1:3' */
    localB->beta = (2.0 * rtu_b + rtu_a) * 0.8660254037844386;
}
/* Model step function for TID0 */
void POTENCIAdelCONVERTIDOR_step0(void) /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
{
    /* local block i/o variables */
    real_T rtb_Product4;
    real_T rtb_Product1;
    real_T rtb_Product2;
    real_T rtb_Product3;
    int16_T k;
    real_T numAccum;
    int32_T bitIdx;
    uint32_T u;
    real_T rtb_P;
    {
        /* Sample time: [0.0001s, 0.0s] */
        rate_monotonic_scheduler();
    }
    /* RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
    if (POTENCIAdelCONVERTIDOR_M->Timing.RateInteraction.TID0_1) {
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.RateTransition =
            POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.RateTransition_Buffer0;
    }
    /* End of RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */

    /* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
    {
        /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
        /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC = (AdcResult.ADCRESULT0);
    }
}
```

```

/* Product: '<Root>/Product4' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant5'
 * Constant: '<Root>/Constant6'
 * Sum: '<Root>/Add1'
 */
rtb_Product4 = ((real_T)POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC -
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant6_Value) *
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant5_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
    /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC5 = (AdcResult.ADCRESULT1);
}
/* Product: '<Root>/Product1' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant5'
 * Constant: '<Root>/Constant6'
 * Sum: '<Root>/Add4'
 */
rtb_Product1 = ((real_T)POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC5 -
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant6_Value) *
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant5_Value;
/* MATLAB Function: '<Root>/Transformada de Clarke2' */
POTEN_TransformadadeClarke2(rtb_Product4, rtb_Product1,
    &POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.sf_TransformadadeClarke2);
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */
    /* External Reference Voltage : Allowable ranges of VREFHI(ADCINA0) = 3.3 and VREFLO(tied
to ground) = 0 */
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC6 = (AdcResult.ADCRESULT2);
}
/* Product: '<Root>/Product2' incorporates:
 * Constant: '<Root>/Constant'
 * Constant: '<Root>/Constant1'
 * Sum: '<Root>/Add2'
 */
rtb_Product2 = ((real_T)POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.ADC6 -
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant_Value) *
                POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant1_Value;
/* S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
{
    /* Internal Reference Voltage : Fixed scale 0 to 3.3 V range. */

```



```

*/
rtb_P = ((POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.sf_TransformadadeClarke2.beta *
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.sf_TransformadadeClarke3.alpha -
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.sf_TransformadadeClarke2.alpha *
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.sf_TransformadadeClarke3.beta) *
    0.666666666666666663 * 9.8458979119984636E-6 - -1.9951632412838627 *
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L]) -
    0.99520262487551059 * POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i
    [1L];
numAccum = (2.0 * POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L] +
    rtb_P) + POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[1L];
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[1L] =
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L];
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[0L] = rtb_P;
rtb_P = (9.8126110186609252E-6 * numAccum - -1.9884180173746586 *
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L]) -
    0.98845726781873322 * POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i
    [3L];
POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.DigitalFilter_n = (2.0 *
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L] + rtb_P) +
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[3L];
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[3L] =
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L];
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.DigitalFilter_FILT_STATES_i[2L] = rtb_P;
/* MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' incorporates:
* Constant: '<Root>/Constant2'
* Constant: '<Root>/Constant3'
* Constant: '<Root>/Constant4'
* Product: '<Root>/Product5'
* Product: '<Root>/Product6'
*/
switch ((int16_T)POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.RateTransition) {
case 1:
    rtb_P = POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.DigitalFilter *
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant2_Value;
    break;

case 2:
    rtb_P = POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.DigitalFilter_n *
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant4_Value;
    break;
default:
    rtb_P = POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.Constant3_Value;
    break;
}

```

```
}
/* End of MultiPortSwitch: '<Root>/Multiport Switch' */
/* S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* Integer to Bit Conversion */
bitIdx = 12L;
u = (uint32_T)rtb_P;
for (k = 0; k < 12; k++) {
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[bitIdx - 1L] = (int16_T)u & 1;
    u >>= 1;
    bitIdx--;
}
/* End of S-Function (scominttobit): '<Root>/Integer to Bit Converter' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO34 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
    GpioDataRegs.GPCLEAR.bit.GPIO34 =
        !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[0] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO18 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO18 =
        !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[2] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO4 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 =
        !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[7] != 0);
}

/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 =
        !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[9] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 =
```

```

(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO0 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[11] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO7 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO7 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[4] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO5 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO5 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[6] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[8] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO1 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[10] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO19 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO19 =
!(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[1] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
{
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12 =
(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12 =

```

Anexos

```
    !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[3] != 0);
}
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO6 =
        (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO6 =
        !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.IntegertoBitConverter[5] != 0);
}
/* DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.PulseGenerator =
    (POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter <
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.PulseGenerator_Duty) &&
    (POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter >= 0L) ?
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.PulseGenerator_Amp : 0.0;
if (POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter >=
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.PulseGenerator_Period - 1.0) {
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter = 0L;
} else {
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter++;
}
/* End of DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
/* S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO29 = (POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.PulseGenerator !=
        0);
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO29 = !(POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.PulseGenerator
        != 0);
}
}

/* Model step function for TID1 */
void POTENCIAdelCONVERTIDOR_step1(void) /* Sample time: [0.0002s, 0.0s] */
{
    real_T rtb_y;
    /* MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' incorporates:
    * UnitDelay: '<Root>/Unit Delay'
    */
    /* MATLAB Function 'MATLAB Function': '<S3>:1' */
    /* '<S3>:1:4' */
    rtb_y = 0.0;
    if (POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.UnitDelay_DSTATE < 3.0) {
        /* '<S3>:1:6' */
        /* '<S3>:1:7' */
    }
}
```

```

    rtb_y = POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.UnitDelay_DSTATE + 1.0;
}
if (POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.UnitDelay_DSTATE >= 3.0) {
    /* '<S3>:1:10' */
    /* '<S3>:1:11' */
    rtb_y = 1.0;
}
/* End of MATLAB Function: '<Root>/MATLAB Function' */
/* Update for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.RateTransition_Buffer0 = rtb_y;
/* Update for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.UnitDelay_DSTATE = rtb_y;
}
/* Model initialize function */
void POTENCIAdelCONVERTIDOR_initialize(void)
{
    /* Registration code */
    /* initialize real-time model */
    (void) memset((void *)POTENCIAdelCONVERTIDOR_M, 0,
        sizeof(RT_MODEL_POTENCIAdelCONVERTID_T));
    /* block I/O */
    (void) memset(((void *) &POTENCIAdelCONVERTIDOR_B), 0,
        sizeof(B_POTENCIAdelCONVERTIDOR_T));
    /* states (dwork) */
    (void) memset((void *)&POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW, 0,
        sizeof(DW_POTENCIAdelCONVERTIDOR_T));
    /* Start for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_B.RateTransition =
        POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.RateTransition_X0;
    /* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC' */
    InitAdc();
    config_ADC_SOC0 ();
    /* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC5' */
    config_ADC_SOC1 ();
    /* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC6' */
    config_ADC_SOC2 ();
    /* Start for S-Function (c2802xadc): '<Root>/ADC7' */
    config_ADC_SOC3 ();
    /* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output' */
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all &= 4294967247U;
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.all |= 4U;
    EDIS;
    /* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output1' */

```

Anexos

```
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 262144U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output10' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294966527U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 16U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output11' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967247U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output12' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967292U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 1U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output2' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294918143U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 128U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output3' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294964223U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 32U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output4' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 8U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output5' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294967283U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 2U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output7' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4294967103U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 524288U;
EDIS;
```

```

/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output8' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4244635647U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 4096U;
EDIS;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output9' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all &= 4294955007U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 64U;
EDIS;
/* Start for DiscretePulseGenerator: '<Root>/Pulse Generator' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.clockTickCounter = 0L;
/* Start for S-Function (c280xgpio_do): '<Root>/Digital Output6' */
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all &= 4093640703U;
GpioCtrlRegs.GPADIR.all |= 536870912U;
EDIS;
/* InitializeConditions for RateTransition: '<Root>/Rate Transition' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.RateTransition_Buffer0 =
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.RateTransition_X0;
/* InitializeConditions for UnitDelay: '<Root>/Unit Delay' */
POTENCIAdelCONVERTIDOR_DW.UnitDelay_DSTATE =
    POTENCIAdelCONVERTIDOR_P.UnitDelay_InitialCondition;
}
/* Model terminate function */
void POTENCIAdelCONVERTIDOR_terminate(void)
{
    /* (no terminate code required) */
}
/*
* File trailer for generated code.
* [EOF]
*/

```

Anexo C Equipos utilizados

Generador Síncrono trifásico

Potencia nominal 350 VA
Velocidad nominal 3600 rpm
Frecuencia 60 Hz
Conexión estrella 220 V y 0,92 A
Conexión delta 127 V y 1,6 A
Excitación 220 V y 0,24 A

Motor DC

Potencia nominal 300 W
Velocidad nominal 3600 rpm
Armadura 220 V y 2,4 A
Excitación 220 V y 0,22 A

Reóstatos LEYBOLD

Excitación del generador
Resistencia 110 Ω
Corriente máxima 2,5 A

Excitación motor DC

Resistencia 110 Ω
Corriente máxima 2,5 A

Armadura motor DC

Resistencia 230 Ω
Corriente máxima 15 A

Autotransformador trifásico

STACO ENERGY
Frecuencia 60 Hz
Voltaje de entrada 240 V
Voltaje de salida 0-280 V
Potencia máxima 2,43 KVA

Carga

Bobinas LEYBOLD
500 vueltas
Resistencia 2,5 Ω
Inductancia 0,011 H
Corriente máxima 2,5 A

Impedancia del sistema de inyección

Bobinas LEYBOLD
250 vueltas
Resistencia 0,6 Ω
Inductancia 0,0027 H
Corriente máxima 5 A

Microprocesador Texas Instrument
Launchpad C2000
F28027