



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“DETECCIÓN DE SECUENCIA DE VOLTAGE PARA CONEXIÓN DE
CONVERTIDORES DE POTENCIA EN MICRORREDES AISLADAS”

AUTOR: CHINLLI CÓNDOR JULIO ALFREDO

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

IBARRA-ECUADOR
OCTUBRE 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR	
CÉDULA DE IDENTIDAD	1004183974
APELLIDOS Y NOMBRES	CHINLLI CÓNDOR JULIO ALFREDO
DIRECCIÓN	Abelardo Morán Muñoz 6-45 y Víctor Gomez Jurado
EMAIL	jachinllic@utn.edu.ec - alfredochinlli@gmail.com
TELÉFONO	0982674872
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	“DETECCIÓN DE SECUENCIA DE VOLTAJE PARA CONEXIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA EN MICRORREDES AISLADAS”
AUTOR	CHINLLI CÓNDOR JULIO ALFREDO
FECHA	OCTUBRE 2022
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MECATRÓNICA
DIRECTOR	CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 13 de octubre de 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Chinli Condor Julio Alfredo".

Chinli Condor Julio Alfredo
C.I. 1004183974



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “DETECCIÓN DE SECUENCIA DE VOLTAJE PARA CONEXIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA EN MICRORREDES AISLADAS”, presentado por el egresado Chinlli Córdor Julio Alfredo, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 13 de octubre de 2022



Carlos Xavier Rosero
DIRECTOR DE TESIS

Agradecimiento

Agradezco a mis padres; José y Laura, a mis hermanos; Christian, Diego y Raúl, y a mi esposa Mercy por creer en mi y brindarme su apoyo incondicional para cumplir esta meta.

Agradezco a mi director Carlos Xavier Rosero por el apoyo, las enseñanzas y paciencia a lo largo de la carrera y para realizar este trabajo.

A mis profesores por los conocimientos impartidos en clase y a mis amigos por acompañarme durante este largo proceso.

Chinlli Cóndor Julio Alfredo

Dedicatoria

Dedico este trabajo con mucho amor a mis padres y a mi hija Alice, por ser mi inspiración y fuerzas en este camino.

Chinli Cóndor Julio Alfredo

Resumen

En los últimos años ha sido evidente el incremento en las fuentes de generación de energía distribuida (DPGS. Distributed Power Generation Sources). Las DPGS provienen principalmente del sol, viento, agua y biomasa (energías renovables). Estas energías en su momento tienen que ser inyectadas a la red principal, pero tienen que cumplir ciertas características para que la red se mantenga eficiente y evite daños a los equipos electrónicos. Una de las características más importantes es la sincronización entre generadores, pero el paso más importante antes de esta sincronización es la detección de secuencia de voltaje que es en lo que se enfoca este trabajo de grado.

La detección de secuencia de voltaje es el paso fundamental que se tiene que realizar antes de sincronizar en fase los convertidores de potencia. Con esto se evita voltajes y frecuencias de mala calidad en la red. Se parte de una revisión literaria y se hace uso de diferentes métodos como el método de los componentes simétricos instantáneos (ISC), que permite descomponer un vector de voltaje en sus componentes $\alpha - \beta$. Seguido a esto se utiliza un bucle de bloqueo de frecuencia (FLL), un integrador generalizado de segundo orden (SOGI) y un generador de señales en cuadratura (QSG). Las señales que salen de estos bloques, entran al bloque de cálculo de secuencia positiva (CSP).

Finalmente para estas simulaciones se utiliza el software matemático Matlab-Simulink. Al modelo realizado se le realizan diferentes pruebas como armónicos de diferente orden, variación de frecuencia y caída de voltaje para comprobar su desempeño frente a estas perturbaciones.

Abstract

In recent years, the increase in distributed power generation sources (DPGS. Distributed Power Generation Sources) has been evident. DPGS come from the sun, wind, water and biomass (renewable energies). These energies at the time have to be injected into the main network, but they have to meet certain characteristics so that the network remains efficient and avoids damage to electronic equipment. One of the most important features is the synchronization between generators, but the most important step before this synchronization is the voltage sequence detection, which is what this Thesis focuses on.

Voltage sequence detection is the fundamental step that has to be performed before power converters can be phase locked. This avoids poor quality voltages and frequencies in the network. It starts from a literature review and uses different methods such as the instantaneous symmetric components (ISC) method, which allows us to decompose a voltage vector into its $\alpha - \beta$ components. This is followed by a Frequency Lock Loop (FLL), a Second Order Generalized Integrator (SOGI), and a Quadrature Signal Generator (QSG). Signals leaving these blocks enter the positive sequence calculation (CSP) block.

Finally, for these simulations, the mathematical software Matlab-Simulink is used. Different tests are carried out on the model carried out, such as harmonics of different order, frequency variation and voltage drop to check its performance against these disturbances.

Índice general

Introducción	1
Problema	1
Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Justificación	4
Alcance	5
1. Revisión Literaria	6
1.1. Microrredes	6
1.2. Sincronización de la Red	7
1.2.1. Perturbaciones que Afectan a la Red	8
1.2.1.1. Armónicos	8
1.2.1.2. Variación de Frecuencia	9
1.2.1.3. Caídas de Voltaje	9
1.2.2. Componentes Simétricos Instantáneos (ISC)	10
1.2.3. Bucle de Bloqueo de Fase (PLL)	12
1.2.4. Integrador Generalizado de Segundo Orden (SOGI)	12
1.2.5. Bucle de Bloqueo de Frecuencia (FLL)	13
1.3. Tabla Comparativa de las Diferentes Técnicas	14
1.4. Propuesta	14

2. Metodología de Detección de Secuencia de Voltaje	16
2.1. Modelo Propuesto	16
2.1.1. Descripción	16
2.1.2. Cálculo de Secuencia de Voltaje en el Marco $\alpha\beta$	17
2.1.3. Generador de Señales en Cuadratura Basado en un SOGI (SOGI-QSG)	20
2.1.4. Detección de Secuencia de Voltaje Usando un SOGI-QSG Doble	24
2.1.5. Estructura de Bloques del Detector de Secuencia de Voltaje	26
3. Pruebas y Resultados	29
3.1. Pruebas	29
3.1.1. Variación de Frecuencia	29
3.1.2. Presencia de Armónicos	31
3.1.2.1. Armónicos de Tercer Orden	31
3.1.2.2. Armónicos de Quinto Orden	34
3.1.2.3. Armónico de Séptimo Orden	36
3.1.3. Caída de Voltaje	38
3.1.4. Perturbación Múltiple	40
4. Conclusiones y Trabajo Futuro	42
4.1. Conclusiones	42
4.2. Trabajo Futuro	43
Anexos	44
A. Enlace para descarga de archivos	45

Índice de figuras

1.1. Armónico de orden 7 en una señal trifásica.	8
1.2. Caída de voltaje de 20% en una señal trifásica.	9
1.3. Componente simétrica de secuencia positiva (+).	10
1.4. Componente simétrica de secuencia negativa (-).	11
1.5. Componente simétrica de secuencia cero (0).	11
1.6. Diagrama de bloques básico de un PLL.	12
1.7. Estructura de un SOGI.	13
1.8. Estructura de un FLL.	14
2.1. Estructura de un SOGI-QSG.	21
2.2. Diagrama de Bode para D.	22
2.3. Diagrama de Bode para Q.	22
2.4. Retardo de 90° de la señal qv' respecto de v'	23
2.5. Estructura de un SOGI-QSG-FLL	24
2.6. Estructura de un DSOGI-QSG-FLL	25
2.7. Estructura general.	27
3.1. Variación de frecuencia de 50Hz a 45Hz.	30
3.2. Presencia de un armónico de tercer orden.	31
3.3. Análisis FFT realizado a la señal de entrada.	32
3.4. Análisis FFT realizado a la señal de salida.	33
3.5. Presencia de un armónico de quinto orden.	34

3.6. Análisis FFT realizado a la señal de entrada.	35
3.7. Análisis FFT realizado a la señal de salida.	35
3.8. Presencia de un armónico de séptimo orden.	36
3.9. Análisis FFT realizado a la señal de entrada.	37
3.10. Análisis FFT realizado a la señal de salida.	38
3.11. Caída de voltaje desbalanceado del 20%	39
3.12. DSOGI-QSG-FLL frente a una perturbación múltiple.	40

Índice de tablas

1.1. Comparativa de los métodos de detección de secuencia de voltaje.	15
2.1. Librerías utilizadas en matlab-simulink	28

Introducción

Este capítulo se presenta el resumen, planteamiento del problema, la justificación y los objetivos.

Problema

Las microrredes que trabajan en modo aislado, son sistemas de electrificación utilizados en zonas que, debido a elevados requerimientos económicos y técnicos, no tienen cobertura de las redes eléctricas tradicionales [1]. Están compuestas por elementos de generación de energía renovable y no renovable, y sistemas de almacenamiento, todos conectados a la microrred a través de convertidores de potencia. Al trabajar en forma aislada de la red principal, las microrredes poseen capacidad de regulación propia que a la vez permite obtener la máxima eficiencia del conjunto fuentes-convertidores [1]. Los convertidores de potencia se conectan en paralelo para soportar cargas con alta demanda de energía. Su conexión/desconexión puede ser asincrónica e inesperada, en especial cuando las fuentes a las que están conectados no son despachables, es decir, son intermitentes (paneles solares, generadores eólicos). Específicamente en una microrred energizada, si un convertidor de potencia de alimentación de red no se conecta en fase con el voltaje existente en la red, no proporciona la potencia adecuada al sistema y disminu-

ye la calidad de este voltaje [1]. En el marco de la necesidad de la implementación real de G aisladas, surge la necesidad de desarrollar una estrategia de detección de secuencia, en base a la literatura existente. La detección de secuencia es el paso fundamental que se debe realizar antes de sincronizar en fase al convertidor que trata de conectarse, con los convertidores que venían trabajando en la G. Esto con el fin de evitar un voltaje con amplitud y frecuencia de mala calidad [1].

Objetivos

Objetivo General

Detectar la secuencia de voltaje para la conexión de convertidores de potencia en microrredes aisladas.

Objetivos Específicos

- Revisar los métodos de detección de secuencia de voltaje en la literatura.
- Proponer un método de detección de secuencia de voltaje a través de un modelo matemático y/o algoritmo que describan su dinámica.
- Comprobar el rendimiento del método propuesto mediante simulaciones de software matemático bajo diferentes escenarios de trabajo.

Justificación

En el proceso de conexión de un convertidor a la microrred energizada, si no se detecta la secuencia del voltaje existente, no será posible la sincronización y por lo tanto no se podrá asegurar el funcionamiento óptimo de la red. El trabajo de grado propuesto se justifica si se considera que resuelve un problema fundamental en la implementación de microrredes reales. Con la culminación de este proyecto se contribuirá en mejorar la comprensión sobre la dinámica de las microrredes aisladas. Esto es un punto de partida para la implementación de soluciones más sofisticadas dentro de la generación distribuida de energía. En otro aspecto, el presente trabajo es importante porque se aplicarán conceptos de control adquiridos durante la formación en ingeniería. Además, se empleará la metodología de desarrollo de proyectos aprendida en la carrera: revisión literaria, propuesta de un método de solución, implementación de la solución y pruebas bajo condiciones controladas de trabajo.

Alcance

En este proyecto se propondrá un método de extracción de secuencia de voltaje con el fin de conectar convertidores de potencia en microrredes aisladas. Primero se revisarán los métodos de extracción de secuencia de voltaje existentes en la literatura. Luego se propondrá un método de extracción de secuencia de voltaje. Se desarrollarán las matemáticas que intervengan en este propósito y finalmente se comprobará el método propuesto bajo condiciones de trabajo. Para ello se utilizarán simulaciones en software matemático.

Capítulo 1

Revisión Literaria

En este capítulo se realizará el estudio del estado del arte en donde se analizarán artículos científicos para conocer propuestas de solución de problemas referentes al tema de este trabajo de grado.

1.1. Microrredes

Las microrredes son sistemas que asocian cargas eléctricas a pequeña escala, acoplados a la red eléctrica mediante inversores de potencia. Estas están siendo cada vez más demandadas, debido a que provienen de energías limpias y su impacto medioambiental es mínimo, ayudando a la conservación del medio ambiente, ya que sus fuentes de energía son renovables. [1]

Estas pueden funcionar en dos formas: Conectadas a la red eléctrica principal o en modo isla (de forma autónoma). En el caso de que la microrred esté conectada a la red principal, la energía puede fluir desde o hacia la red; esto dependerá del consumo o generación de energía

que esté requiriendo la red distribuida. Cuando la microrred no está conectada a la red principal quiere decir que está aislada, debido a que no intercambia energía con redes externas. En este caso las características eléctricas de la microrred cambian. Al cambiar sus características eléctricas, aumentan las perturbaciones en la calidad de la red. Esto puede afectar a los distintos dispositivos electrónicos. [1]

Si bien las microrredes presentan una gran ventaja medioambiental y tecnológica para suplir las necesidades en zonas donde no hay cobertura de las redes eléctricas tradicionales. Estas presentan ciertas desventajas que se tienen que controlar para producir y entregar energía de calidad. Una de estas desventajas se da en los convertidores de potencia que se conectan en paralelo para soportar cargas con alta demanda energética. Estos convertidores de potencia se tienen que conectar en fase con el voltaje de la red. Para ello se plantea desarrollar un método de detección de secuencia de voltaje antes de sincronizar en fase a los convertidores de potencia, para evitar voltajes de mala calidad en la red.

1.2. Sincronización de la Red

Entre los aspectos más fundamentales en la conexión de convertidores de potencia a la red, se encuentra la sincronización de las fuentes. Para esto se necesita obtener la amplitud, frecuencia y un método de detección de secuencia de voltaje para estimar estos valores y que los convertidores de potencia se sincronicen correctamente con la red [20], esto para evitar voltajes y frecuencias de mala calidad. Para esto se analizan algunos métodos descritos en la literatura.

1.2.1. Perturbaciones que Afectan a la Red

La red eléctrica puede sufrir diferentes perturbaciones que afectan a la calidad de la señal. Entre estas se tiene: caídas de voltaje, variación de frecuencia y armónicos. A continuación se realiza una breve descripción de cada una de ellas. [2]

1.2.1.1. Armónicos

Los armónicos son ondas senoidales, cuyo orden es la multiplicación (2,3,4,5,6,7...n) de la frecuencia fundamental. Es decir, un armónico de orden 2 con frecuencia fundamental de 50Hz es igual a 100Hz, y así sucesivamente. [2]

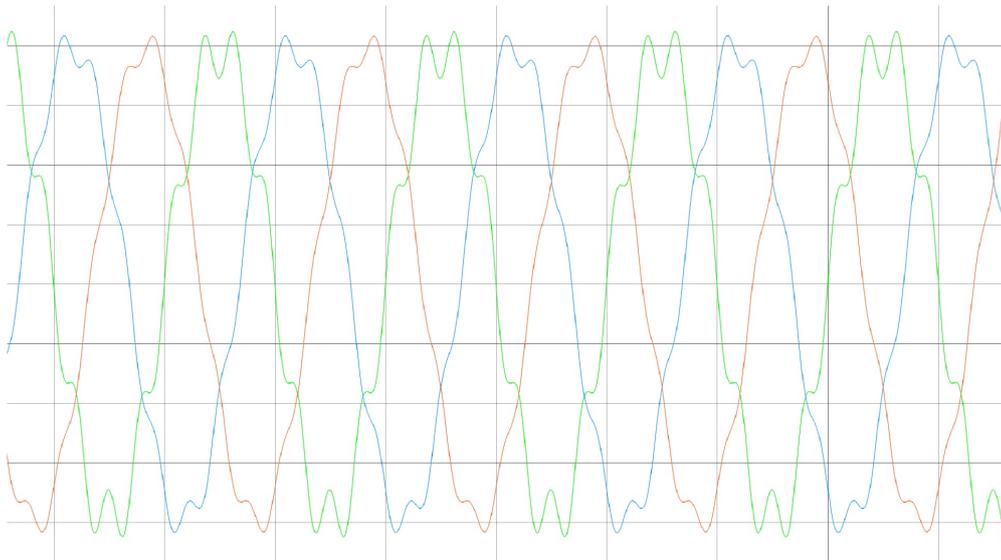


Figura 1.1: Armónico de orden 7 en una señal trifásica.

1.2.1.2. Variación de Frecuencia

La frecuencia nominal de un voltaje es de 50Hz o 60Hz. Estos suelen sufrir variaciones cuando hay un desequilibrio significativo entre la carga y la generación de energía. [2]

1.2.1.3. Caídas de Voltaje

Una caída de voltaje se trata de una disminución de este a un valor por debajo del 90%. Este voltaje se restablece al pasar un periodo de tiempo bastante corto (alrededor de 10 ms a 1 min). Si la variación de este voltaje no está por debajo del 90%, no se considera caída de voltaje. [2, 19]

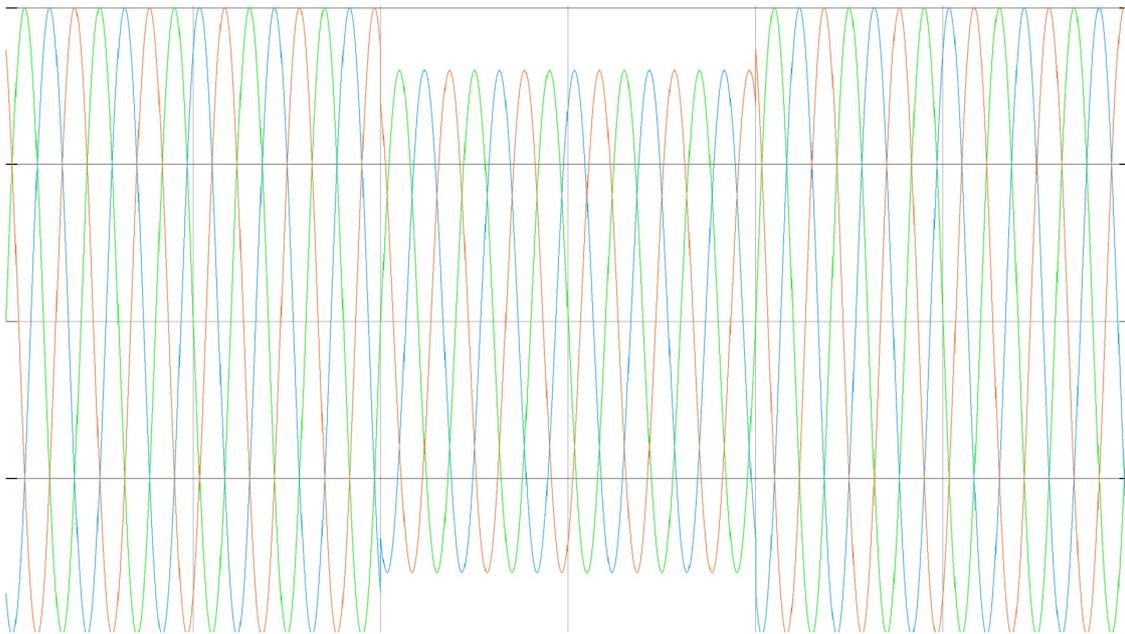


Figura 1.2: Caída de voltaje de 20% en una señal trifásica.

1.2.2. Componentes Simétricos Instantáneos (ISC)

De acuerdo a la revisión literaria, antes de la sincronización con la red se tiene que realizar el cálculo de las secuencias de voltaje. Los trabajos realizados en [4, 5, 6, 7, 8, 9] utilizan el método de componentes simétricos instantáneos (ISC) para realizar esta detección. Este método se basa en la ecuación (1.1) que se trata de la transformación de los componentes simétricos. Esta ecuación (1.1) se utiliza para descomponer los voltajes y corrientes de un sistema trifásico en tres sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricos. [3]

$$\begin{bmatrix} V(+) \\ V(-) \\ V(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA \\ VB \\ VC \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Esos tres sistemas son: la secuencia positiva (+), secuencia negativa (-) y secuencia cero (0), y estos vectores se representan en la Fig. 1.3, 1.4 y 1.5 respectivamente.

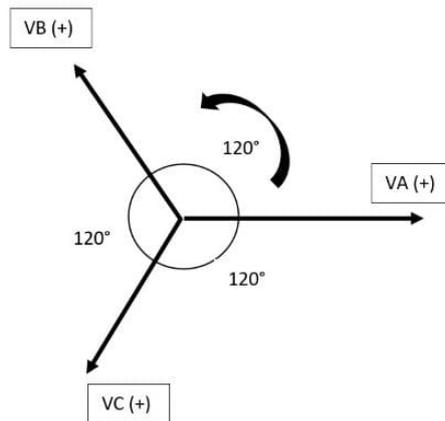


Figura 1.3: Componente simétrica de secuencia positiva (+).

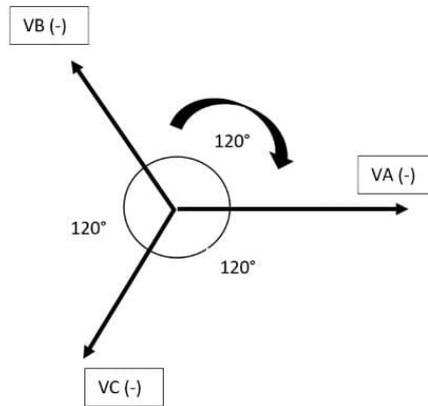


Figura 1.4: Componente simétrica de secuencia negativa (-).

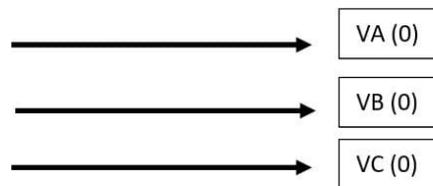


Figura 1.5: Componente simétrica de secuencia cero (0).

Cabe mencionar que no importa la distorsión y desequilibrio del sistema trifásico, este siempre se puede descomponer en tres sistemas equilibrados ficticios. Estos sistemas sirven como herramienta de cálculo. Al final cualquier sistema trifásico desequilibrado se podrá resolver con la suma de los tres sistemas equilibrados ficticios. [8]

1.2.3. Bucle de Bloqueo de Fase (PLL)

El PLL es uno de los métodos más utilizados para la sincronización de la red [4, 9]. Tiene la capacidad de seguir el voltaje de secuencia positiva (+), muy rápidamente, para así eliminar las imperfecciones que hay en las señales de la red. Este incluso debe ser efectivo durante caídas de voltaje o voltajes desbalanceados o distorsionados. Pero en ocasiones necesita que su estructura sea mejorada. Para ello se utiliza un Generador de Señales en Cuadratura (QSG). En [4, 10], utse utiliza un PLL como bloque funcional fundamental para realizar la detección de secuencia.

En la Fig. 1.6. se muestra la estructura básica de un PLL. [20]

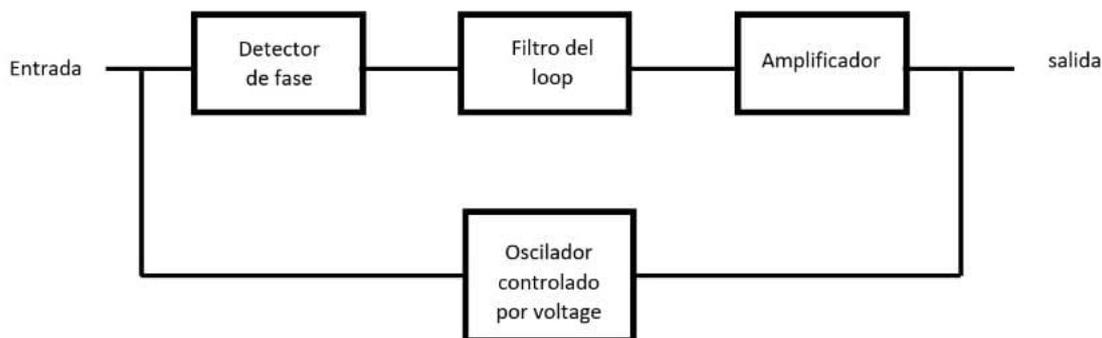


Figura 1.6: Diagrama de bloques básico de un PLL.

1.2.4. Integrador Generalizado de Segundo Orden (SOGI)

Otra de los técnicas más utilizados es el SOGI. Este es un filtro activo que se utiliza para esquematizar controladores en el marco de referencia estacionario [5, 12]. Esta técnica es apropiada debido a que su complejidad no es tan alta al momento de implementarse en simulación, pero es eficaz, ya que, responde efectivamente a las perturbaciones, armónicos y desequilibrio

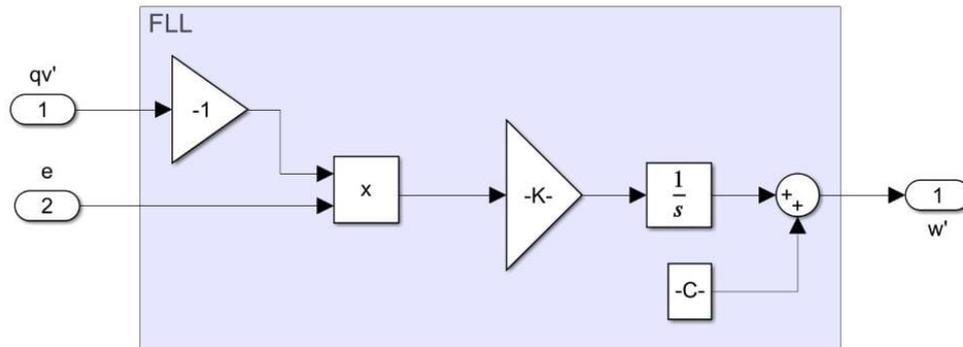


Figura 1.8: Estructura de un FLL.

1.3. Tabla Comparativa de las Diferentes Técnicas

De acuerdo a la literatura, se han escogido tres métodos para la detección de secuencia de voltaje. Estos métodos aplican las diferentes técnicas mencionadas anteriormente, las cuales van desde usar un Integrador Generalizado de Segundo Orden Dual (DSOGI) [4, 5, 11], el uso de un FLL en lugar de un PLL [4, 9, 17], hasta el uso de Integradores Generalizados de Segundo Orden Múltiple (MSOGIs) [12]. Estos son explicados brevemente en la Tabla 1.1.

1.4. Propuesta

Una vez revisado las distintas técnicas, se propone el desarrollo de un método de detección de secuencia de voltaje basado en la literatura. Como se revisó anteriormente, estos métodos utilizan principalmente los bloques SOGI, PLL y FLL. De estos bloques se deriva el DSOGI, DSOGI-PLL, DSOGI-FLL, MSOGI-FLL. En el Capítulo II se elige un método para este trabajo

Tabla 1.1: Comparativa de los métodos de detección de secuencia de voltaje.

Métodos		
Método 1	DSOGI-PLL	El método expuesto en [4], hace el uso de tres bloques para lograr su fin. Estos bloques son, el bloque de Generador de Señales en Cuadratura (QSG), el bloque de Bucle de Bloqueo de Fase (PLL) y el bloque de Calculo de Secuencia Positiva (PSC). En este hacen uso de un DSOGI para implementar un QSG. Con esto los hacen conveniente para caracterizar los voltajes de secuencia positiva bajo voltajes de red desequilibrados.
Método 2	DSOGI-FLL	El método expuesto en [5], es adaptativo a la frecuencia, debido a que utiliza un bloque FLL en lugar de un bloque PLL. Es efectivo frente a eventos repentinos como voltajes desequilibrados y supera los inconvenientes. No utiliza funciones trigonométricas lo cual lo hace menos complejo.
Método 3	MSOGI-FLL	El método expuesto en [12], también es adaptativo a la frecuencia, Este en comparación a los dos anteriores utiliza múltiples SOGI-QSGs. Esto lo bastante complejo a la hora de implementarse en simulación, por ende se descartaría en este trabajo.

de grado, que sea capaz de rechazar los distintos amónicos y voltajes desequilibrados presentes en la red. Se utilizan los bloques descritos anteriormente que mejor se acoplen a lo requerido.

Todo esto siguiendo uno de los métodos expuestos en la Tabla 1.1.

Capítulo 2

Metodología de Detección de Secuencia de Voltaje

En este capítulo se realizará la descripción de la matemática del método propuesto para la detección de secuencia de voltaje.

2.1. Modelo Propuesto

2.1.1. Descripción

Después de revisar diversos modelos de detección de secuencia presentes en la literatura como [4] - [17]. Se propone un método de detección de secuencia de voltaje que se basa en [5]. Para llevar a cabo este propósito, se hace un uso apropiado de los métodos que mejor se adapten a la propuesta y que fueron descritos en el capítulo 1.

2.1.2. Cálculo de Secuencia de Voltaje en el Marco $\alpha\beta$

Según lo mencionado por *Lion* [18], el componente de voltaje de secuencia positiva V_{abc}^+ del vector $V_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ se calcula por:

$$V_{abc}^+ = [v_a^+ \ v_b^+ \ v_c^+]^T = [T_+] \cdot V_{abc}, \quad (2.1)$$

donde $[T_+]$ es:

$$[T_+] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 \\ (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 & 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} & (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Para este caso se utiliza un vector de voltaje genérico con magnitud de 220V, frecuencia 50Hz, ángulo de 120° y $w = 2\pi f$, donde: $V_a = 220 * [\cos(wt)]V$, $V_b = 220 * [\cos(wt) - 120^\circ]V$ y $V_c = 220 * [\cos(wt) + 120^\circ]V$. Estos voltajes pueden ser expresados como fasores siendo $V_a = 220 * \angle 0^\circ$, $V_b = 220 * \angle -120^\circ$ y $V_c = 220 * \angle 120^\circ$. Estos fasores a su vez pueden ser expresados en su forma rectangular con su parte real e imaginaria siendo: $V_a = 220 * (\cos(0) + i * \sin(0))$, $V_b = 220 * (\cos(-120) + i * \sin(-120))$ y $V_c = 220 * (\cos(120) + i * \sin(120))$.

Se hace la multiplicación de (2.1)

$$V_{abc}^+ = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 \\ (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 & 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} & (e^{j\frac{2\pi}{3}})^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 220 * (\cos(0) + i * \sin(0)) \\ 220 * (\cos(-120) + i * \sin(-120)) \\ 220 * (\cos(120) + i * \sin(120)) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$V_{abc}^+ = \begin{bmatrix} 220 & 0i \\ -110 - 191i \\ -110 + 191i \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Para realizar la transformación de los componentes de voltaje del marco de referencia natural abc al marco de referencia $\alpha\beta$ se utiliza la transformación de *Clarke* que se muestra a continuación:

$$V_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}] \cdot V_{abc} \quad (2.5)$$

donde la expresión $[T_{\alpha\beta}]$ es igual a:

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Por tanto se realiza la operación de (2.5)

$$V_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 220 & 0i \\ -110 - 191i \\ -110 + 191i \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$V_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 220 & 0i \\ 0 & -220i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Con esto se puede calcular el voltaje de secuencia positiva en el marco $\alpha\beta$ de la siguiente manera: $V_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] \cdot V_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] \cdot [T_+] \cdot V_{abc}$, de la cual según [4, 5] se obtiene la siguiente ecuación.

$$V_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] \cdot [T_+] \cdot [T_{\alpha\beta}]^T \cdot V_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \cdot V_{\alpha\beta} \quad (2.9)$$

para $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ el cual es el operador en el dominio del tiempo, con la fase de desplazamiento de 90° . Esta sirve para conseguir la forma de onda en cuadratura de una forma de onda original. [5, 6, 11, 15]. Por consiguiente, aplicando la ecuación (2.9), el voltaje queda de la siguiente manera:

$$V_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 220 & 0i \\ 0 & -220i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$V_{\alpha\beta}^+ = \begin{bmatrix} 220 & 0i \\ 0 & -220i \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

El bloque CSP es la que se encarga de implementar la ecuación (2.9) para realizar la detección de secuencia de voltaje esperada.

2.1.3. Generador de Señales en Cuadratura Basado en un SOGI (SOGI-QSG)

Hay diversos métodos expuestos en la literatura para generar señales en cuadratura adaptativas a la frecuencia. Pero estos métodos se basan en PLLs basados en la transformación de Park [10, 4], o PLL basados en la transformación de Hilbert [16, 17]. También tienden a ser muy complejos. Para evitar lo complejo de otros métodos, en [4, 5, 11, 12] utilizan un Integrador Generalizado de Segundo Orden para Generación de Señales en Cuadratura (SOGI-QSG). La figura 2.1. muestra la estructura de SOGI-QSG.

La función de transferencia característica del SOGI según [4, 11, 12] mostrada en la Fig. 1.7. está dada por:

$$S(s) = \frac{d}{f}(s) = \frac{s * w'}{s^2 + w'^2} \quad (2.12)$$

en esta ecuación se puede observar que si a la entrada f ingresa una señal senoidal a la frecuencia w' , el SOGI actuará como un integrador de ganancia infinita. [5]

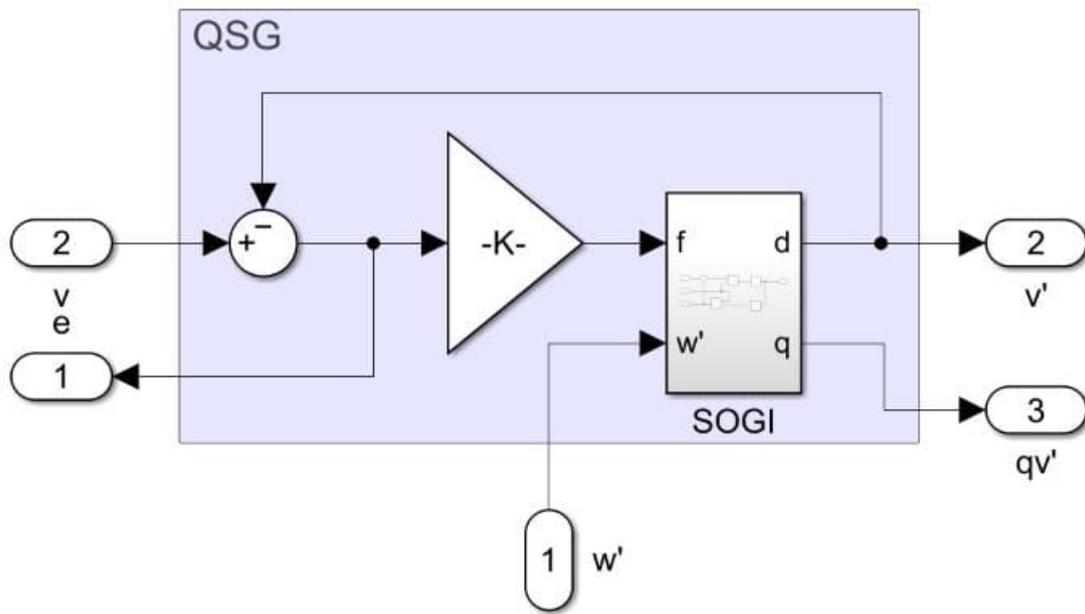


Figura 2.1: Estructura de un SOGI-QSG.

Las funciones de transferencia del sistema mostrado en la Fig. 2.1. se muestran a continuación. [5, 12, 15]

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k * w' * s}{s^2 + k * w' * s + w'^2} = \frac{\sqrt{2} * 50 * s}{s^2 + \sqrt{2} * 50 * s + 50^2} \quad (2.13)$$

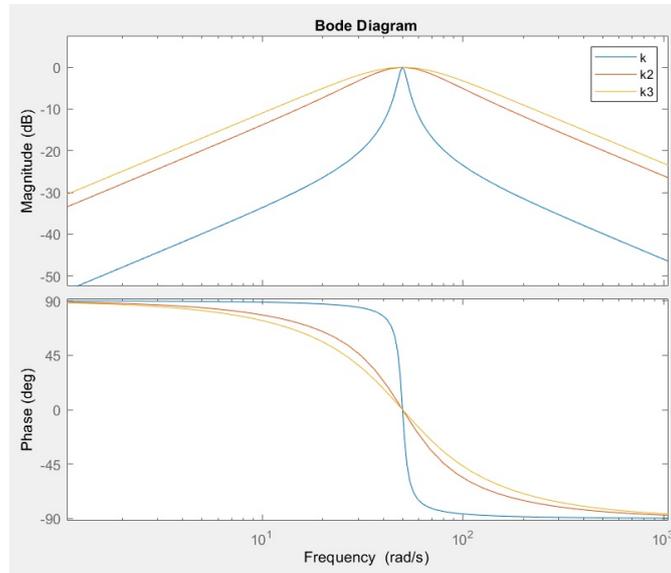


Figura 2.2: Diagrama de Bode para D.

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{kw'^2}{s^2 + kw's + w'^2} = \frac{\sqrt{2} * 50^2}{s^2 + \sqrt{2} * 50 * s + 50^2} \quad (2.14)$$

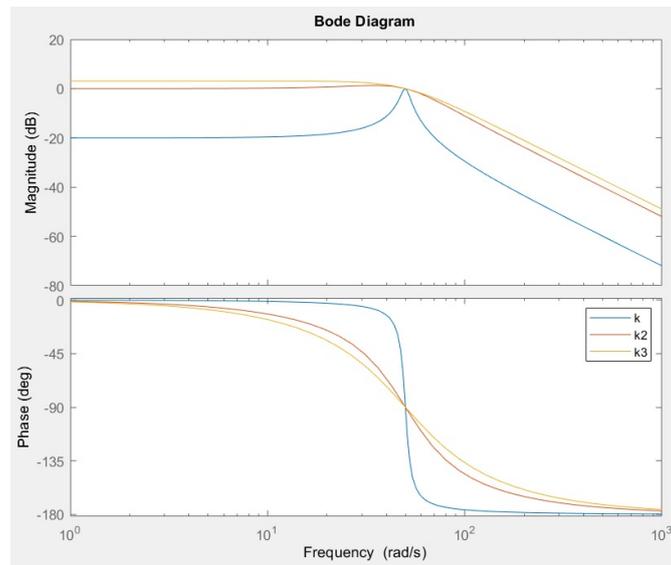


Figura 2.3: Diagrama de Bode para Q.

donde w' es la frecuencia de resonancia y k el factor de amortiguamiento. En este caso los valores de k graficados en el diagrama de Bode fueron: $k = 0.1$, $k_2 = 1$ y $k_3 = \sqrt{2}$. Como se puede notar en las Fig. 2.2. y 2.3. el SOGI-QSG responde mejor cuando $k_3 = \sqrt{2}$. [4, 5]

La información proporcionada por estas funciones de transferencia nos dice que para la salida v' , el sistema se comporta como filtro de paso-banda y para la salida qv' , el sistema se comporta como filtro paso-bajo. Estas características para v' y qv' son muy interesantes, ya que ayudan a mitigar los armónicos a la entrada de la señal. Hay que notar que a la salida de la señal del SOGI-QSG, qv' estará 90° retardada de v' . También hay que tener en cuenta, que si a la entrada v ingresa una señal senoidal, la salida también sera senoidal, como se puede notar en la Fig. 2.4.

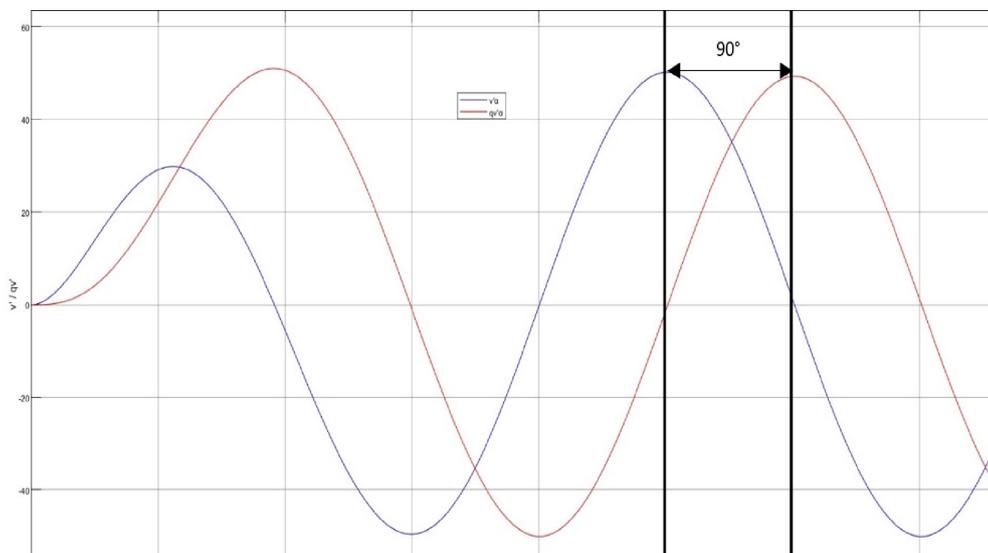


Figura 2.4: Retardo de 90° de la señal qv' respecto de v' .

2.1.4. Detección de Secuencia de Voltaje Usando un SOGI-QSG Doble

Como se revisó en capítulo 1, el PLL es uno de los métodos más utilizados, pero un poco complejo para implementar en simulación. Al tenerse en cuenta esto, a este bloque se lo puede reemplazar por un bloque FLL, como se muestra en la Fig. 1.6.

La estructura del FLL conectado a un SOGI-QSG se puede ver a continuación, en donde se observa que un controlador integrador con una ganancia k , que se encarga de procesar la multiplicación de $-qv'$ por e , para así obtener la frecuencia central de red estimada. [5, 11, 12]

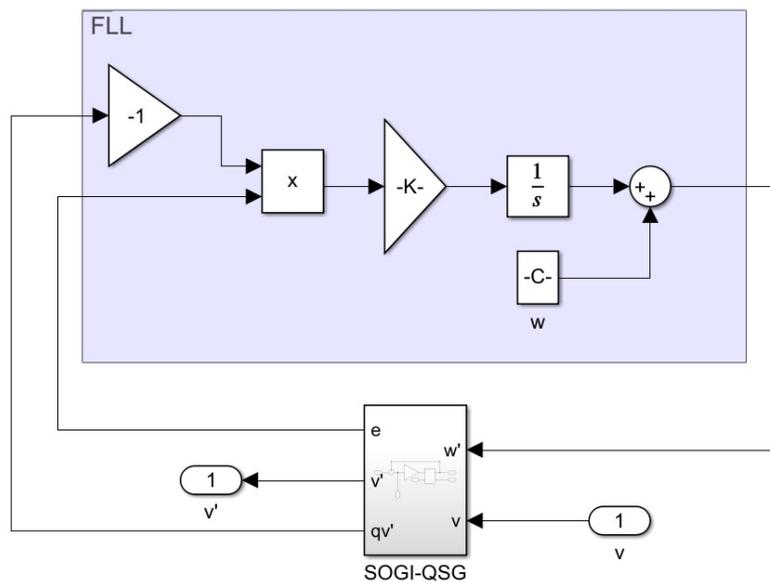


Figura 2.5: Estructura de un SOGI-QSG-FLL

A la estructura SOGI-QSG-FLL mostrada en la Fig. 2.5. y para aplicaciones trifásicas se le añade un segundo SOGI-QSG, como se muestra en la Fig. 2.6. En esta configuración se puede observar que se utiliza un FLL y dos SOGI-QSGs. El SOGI-QSG1 obtiene los voltajes v'_α y

qv'_α mientras que el SOGI-QSG2 obtiene el voltaje v'_β y qv'_β . Estos voltajes son importantes ya que son las señales de entrada en el marco de referencia $\alpha\beta$. Ingresan al bloque de cálculo de secuencia positiva (CSP), para obtener así las componentes de secuencia positiva V_α^+ y V_β^+ , las cuales realiza la transformación mostrada en la ecuación (2.5).

A esta configuración se le denomina DSOGI-QSG-FLL, y es bastante sencilla comparado con otras estructuras más complejas las cuales utilizan PLLs. Esta además consigue superar los obstáculos que han presentado otras estructuras que emplean bloques similares. Y obtiene así el componente de voltaje de secuencia positiva cuando la red opera en condiciones genéricas.

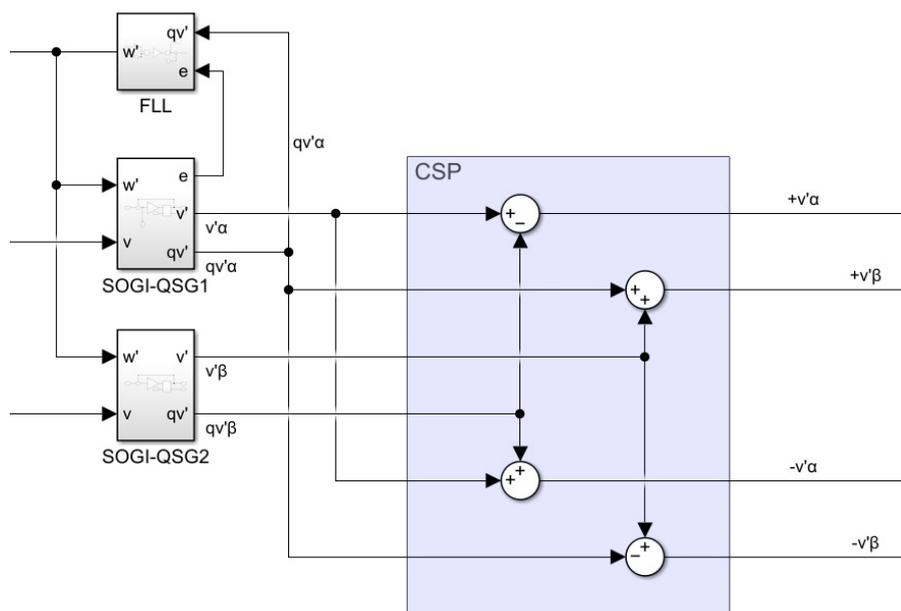


Figura 2.6: Estructura de un DSOGI-QSG-FLL

Para obtener la función de transferencia de $V_{\alpha\beta}$ a $V_{\alpha\beta}^+$ siendo $V_{\alpha\beta}$ un voltaje de secuencia positivo balanceado a la frecuencia w , hay que tener en cuenta la relación, $v_\beta(s) = -\frac{s}{w}v_\alpha(s)$, sabiendo que:

$$v_{\alpha}^{+'}(s) = \frac{1}{2}(v'_{\alpha}(s) - qv'_{\beta}(s)) = \frac{1}{2}(D(s) + \frac{s}{w}Q(s))v_{\alpha}(s) \quad (2.15)$$

donde $D(s)$ y $Q(s)$ son las funciones de transferencia presentadas en (2.13) y (2.14) respectivamente [5]. Para obtener la función de transferencia de $v_{\alpha}^{+'}$ en el dominio de la frecuencia compleja se tiene la siguiente ecuación:

$$P(jw) = \frac{v_{\alpha}^{+'}}{v_{\alpha}}(jw) = \frac{1}{2} \frac{kw'(w + w')}{kw'w + j(w^2 - w'^2)} \quad (2.16)$$

donde w' es la frecuencia que detecta el FLL. Este procedimiento es para la señal α . Para la señal β el procedimiento es similar, ya que esta tiene la misma amplitud que la señal α , pero está 90° retardada.

2.1.5. Estructura de Bloques del Detector de Secuencia de Voltaje

La estructura general de bloques del algoritmo de detección de secuencia de voltaje se presenta en la Fig. 2.7.

Para la simulación se emplea Matlab-Simulink debido a que es un entorno de programación gráfico. Este software matemático modela, simula y analiza sistemas dinámicos.

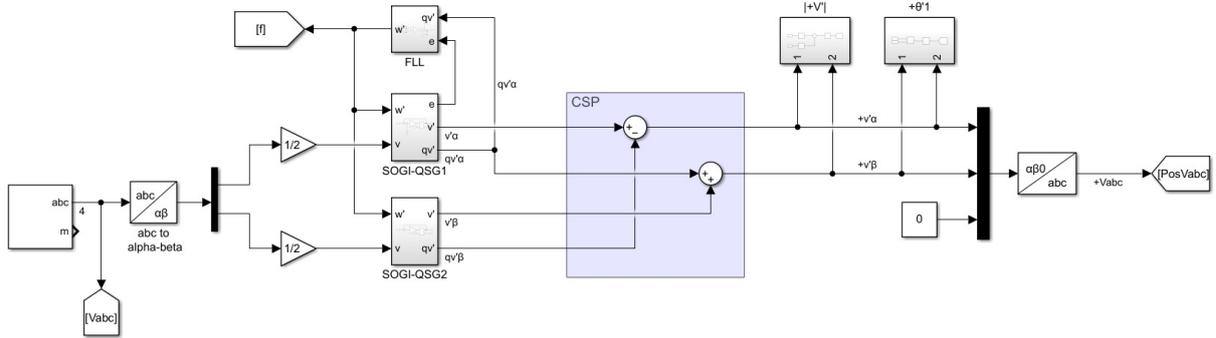


Figura 2.7: Estructura general.

En el modelo de entrada tenemos un bloque llamado "Three-Phase Programmable Generator", que genera una señal trifásica V_{abc} . Estas señales ingresan a un bloque donde se realiza la transformada de Clarke de acuerdo a (2.5), que da dos señales, una α y una β . Estas señales ingresan al SOGI-QSG1 y SOGI-QSG2 respectivamente. El FLL se encargan de obtener la frecuencia de la red central. Una vez salen estas señales, ingresan al bloque CSP el cual se encarga de obtener el voltaje $V_{\alpha\beta}^{+'}$ de secuencia positiva. Finalmente a este voltaje se le aplica la transformada inversa de Clarke, llevándolo de un marco de referencia estacionario a una señal trifásica en marco de referencia natural abc .

La magnitud $|V^{+'}|$ y el ángulo $\theta^{+'}$ del voltaje de secuencia positiva, están dadas por las ecuaciones (2.13) y (2.14) respectivamente. [12]

$$|V^{+'}| = \sqrt{(v_{\alpha}^{+})^2 + (v_{\beta}^{+})^2} \quad (2.17)$$

$$\theta'^+ = \text{tang}^{-1} \frac{v_{\beta}^+}{v_{\alpha}^+}. \quad (2.18)$$

En la tabla 2.1. se detalla las librerías y funciones utilizadas en matlab-simulink para la creación del algoritmo de detección de secuencia de voltaje.

Tabla 2.1: Librerías utilizadas en matlab-simulink

Librerías	Funciones utilizadas
Simulink	From, goto, mux, Dmux, Gain, Sum, inport, Outport, product, Integrator, scope, constmat, Divide, Tan, Math Function, Square Root
SimScape	Three-Phase Programmable Generator, abc to alpha-beta, Alpha-Beta-Zero to abc

Como se pudo notar en la Fig. 2.7. el algoritmo consiste de tres bloques principales; el DSOGI-QSG, el FLL y el CSP el cual utiliza el método ISC descrito en el capítulo 1. En el siguiente capítulo se realizarán diferentes pruebas al método para comprobar su eficacia.

Capítulo 3

Pruebas y Resultados

En este capítulo se presentarán diferentes escenarios de prueba, se tomará información y se analizarán los resultados. Todo esto en software matemático.

3.1. Pruebas

Como se vio en el capítulo 1, hay diferentes perturbaciones que afectan a la red. Se utilizarán estas perturbaciones para probar el método de detección de secuencia de voltaje. Se utiliza un factor de amortiguamiento de $k3 = \sqrt{2}$ para el SOGI-QSG, ya que como se vio en el Capítulo II tiene una mejor respuesta.

3.1.1. Variación de Frecuencia

Para las diferentes pruebas se realizar, se inicia suponiendo que el sistema sufre un cambio repentino de frecuencia que va de 50Hz a 45Hz. Se supone un voltaje de 220Vrms. Esto sucede en $t=0.1s$ y $t=0.2s$. En este caso el voltaje se mantiene y la frecuencia queda en 45Hz. En la Fig.3.1. se puede observar el comportamiento del sistema.

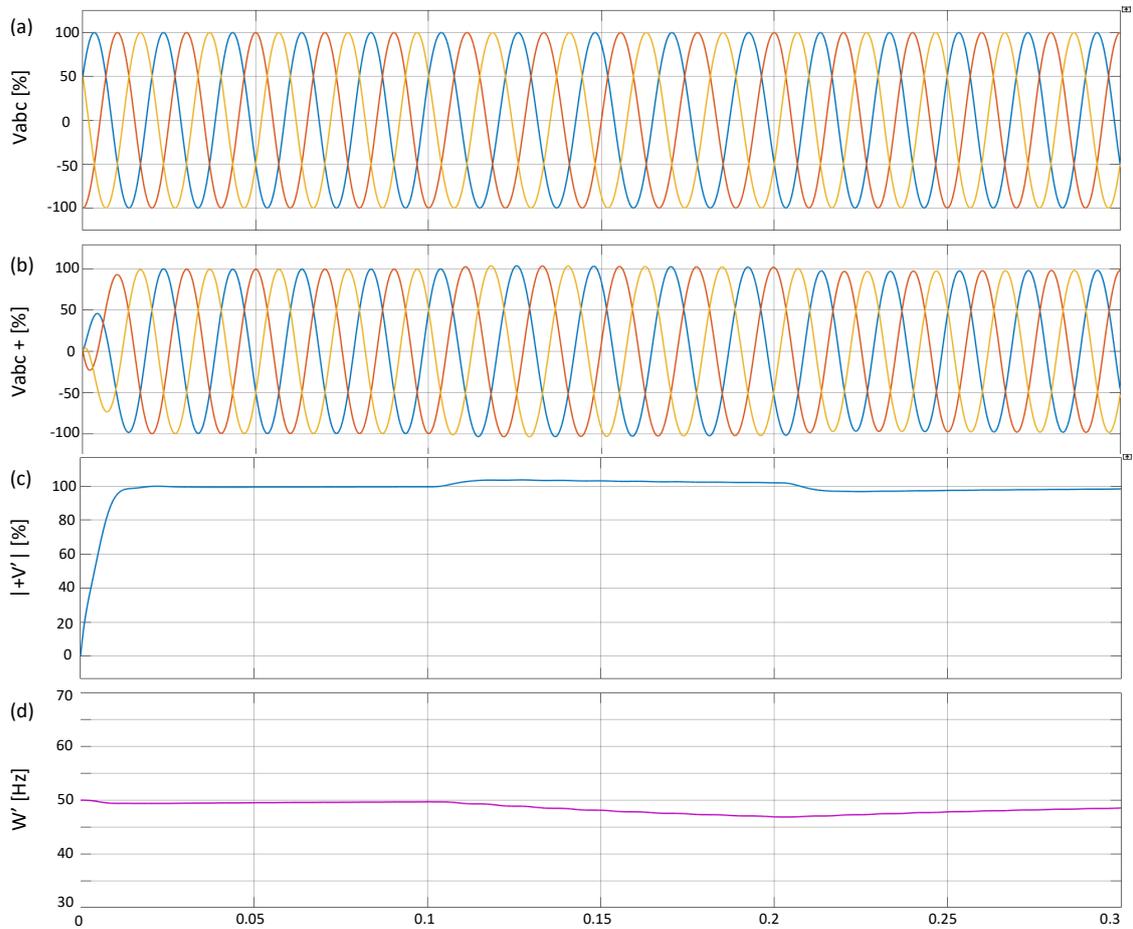


Figura 3.1: Variación de frecuencia de 50Hz a 45Hz.

En la gráfica (a) se representa el voltaje de entrada en el marco de referencia natural abc . La gráfica (b), se puede ver como el sistema hace una correcta detección del voltaje V_{abc}^{+} de secuencia positiva. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En este se puede ver que presenta ligeros picos los cuales se estabilizan en corto tiempo. La gráfica (d) demuestra la buena respuesta del sistema, ya que como se ve, la frecuencia no presenta oscilaciones mientras sufre esta variación en el $t=0.1s$ y $t=0.2s$.

3.1.2. Presencia de Armónicos

De acuerdo a [21], la distorsión armónica total (THD) no tiene que ser mayor al 5%. Se analizarán las señales de entrada y de salida con la herramienta de simulink FFT (Fourier Fast Transformer) para comprobar el THD. El sistema se evaluará en presencia de armónicos que van desde el tercer, quinto y séptimo orden.

3.1.2.1. Armónicos de Tercer Orden

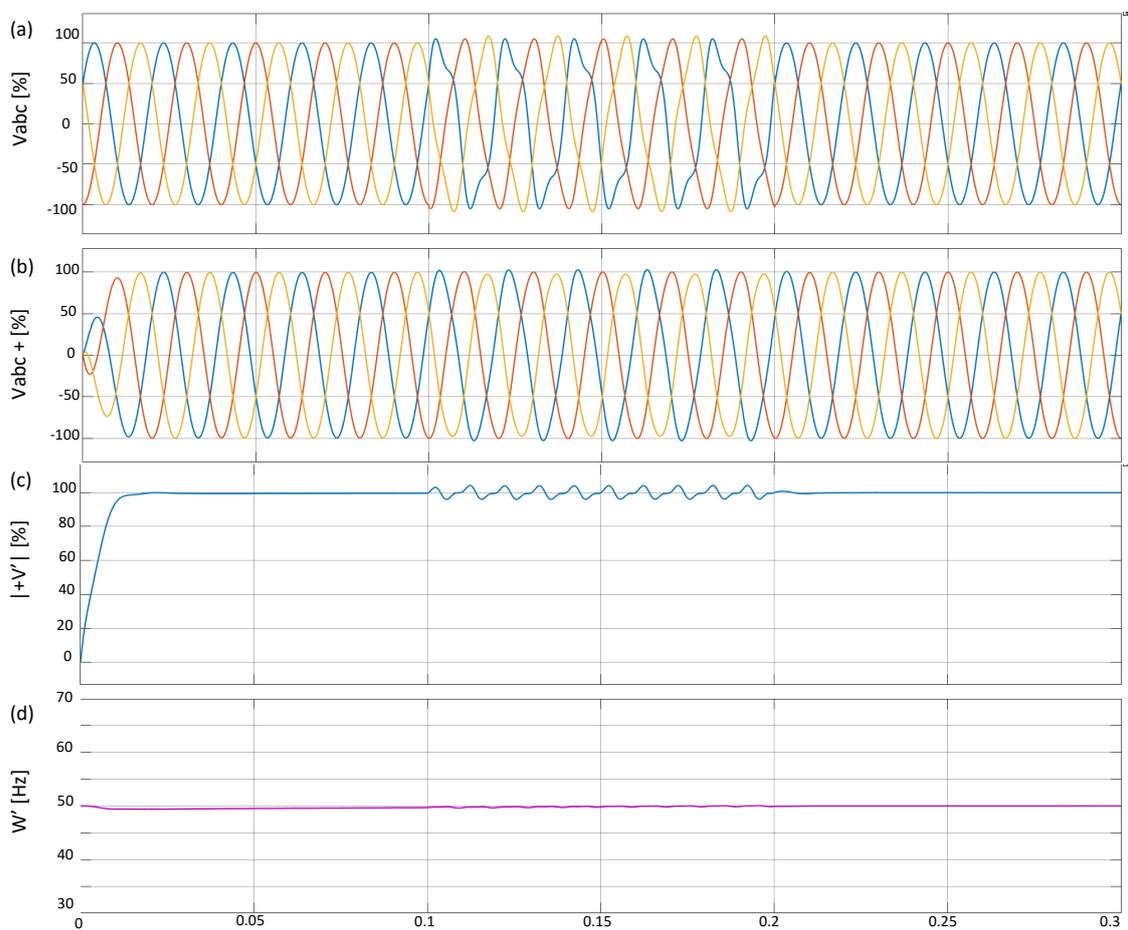


Figura 3.2: Presencia de un armónico de tercer orden.

En la gráfica (a) se representa el voltaje de entrada en el marco de referencia natural. Como se puede ver, es claro el armónico de tercer orden que lo afecta. La gráfica (b), se puede ver como el sistema mitiga los armónicos dándonos una señal mas pura. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En este se puede ver que presenta ligeras oscilaciones que el armónico provoca. La gráfica (d) muestra que la frecuencia sufre ligeras oscilaciones de aproximadamente $\pm 0.25\text{Hz}$, esto demuestra la eficacia del sistema al detectar frecuencia.

Se analizará el porcentaje de THD para la señal de entrada y señal de salida, teniendo en cuenta [21]. Se fija el numero de ciclos en 5, empezando en $t=0.1\text{s}$, que es cuando el armónico afecta a la red.

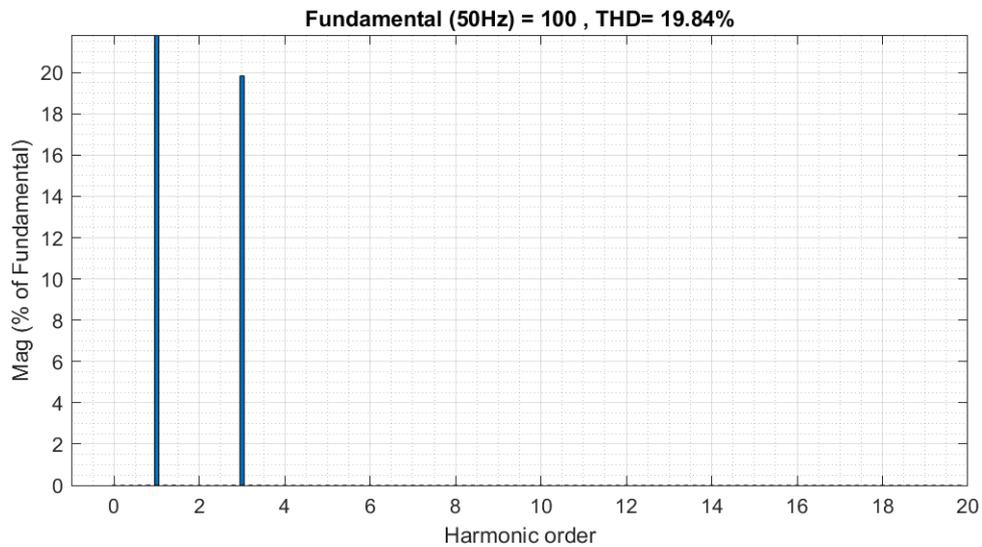


Figura 3.3: Análisis FFT realizado a la señal de entrada.

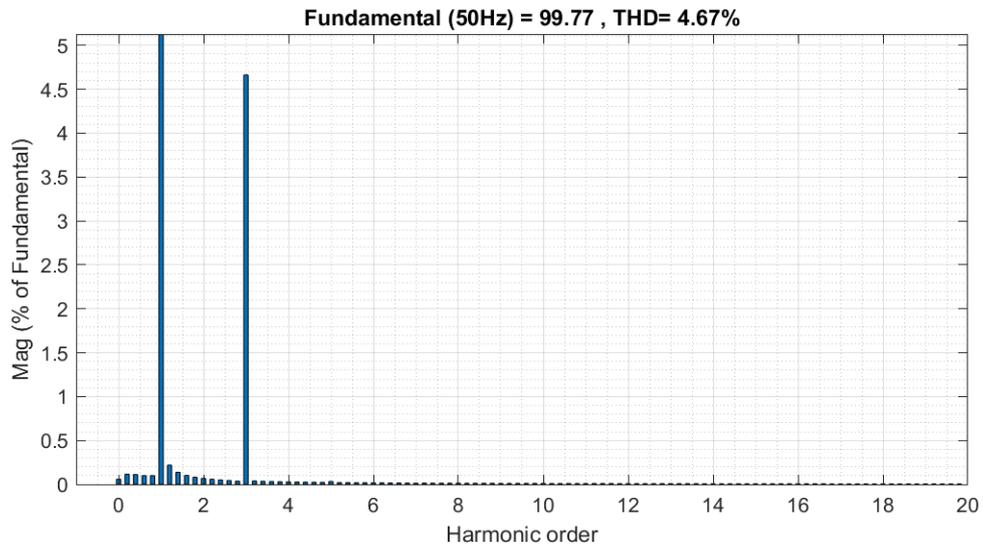


Figura 3.4: Análisis FFT realizado a la señal de salida.

Las Fig. 3.3 y 3.4 muestran el THD para la señal de entrada y salida respectivamente. En la Fig. 3.3. se puede observar que el mayor armónico tiene una magnitud de 100 y el THD es 19.84% debido al armónico de tercer orden. En Fig. 3.4 el mayor armónico tiene una magnitud de 99.77 y el THD es 4.67%, comprobando la buena respuesta del sistema.

3.1.2.2. Armónicos de Quinto Orden

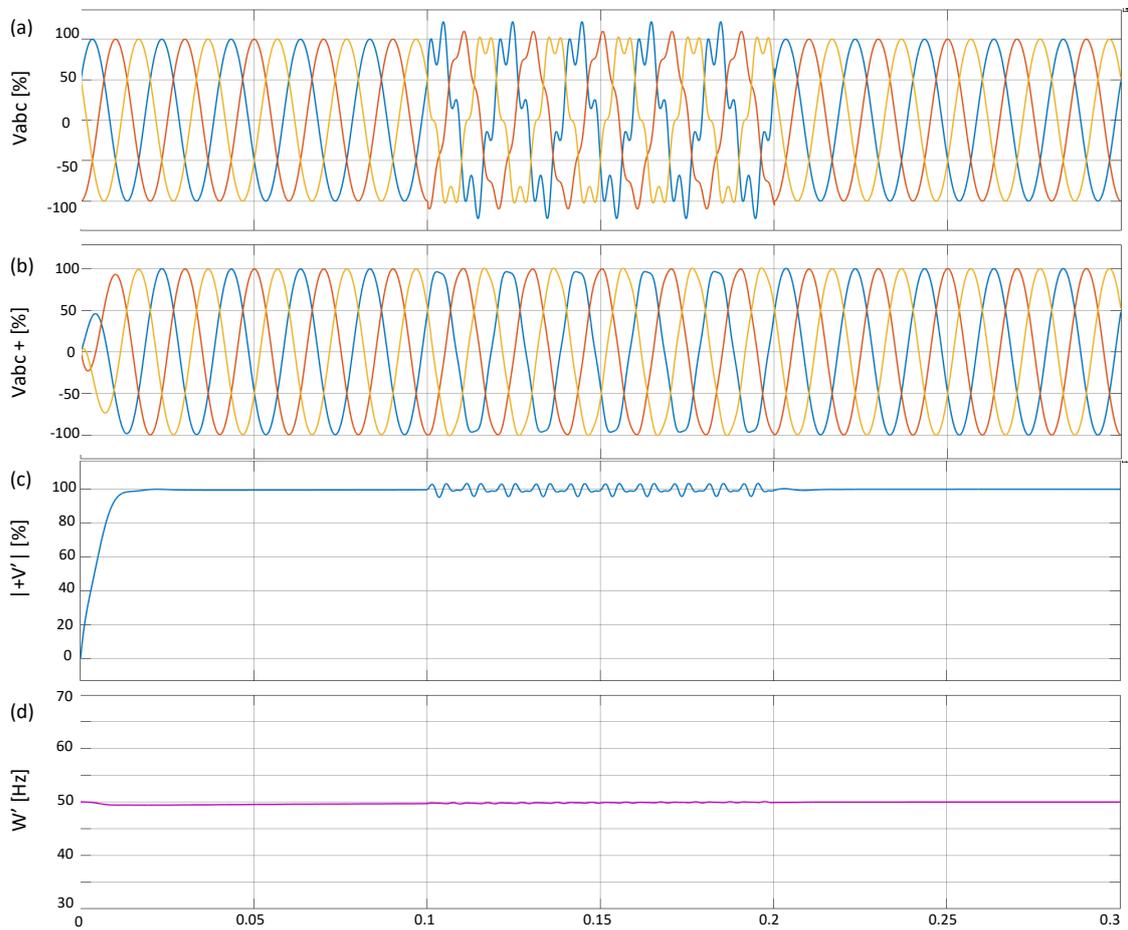


Figura 3.5: Presencia de un armónico de quinto orden.

En la gráfica (a) se representa el voltaje de entrada en el marco de referencia natural. Como se puede ver, ahora es mucho más evidente el armónico de quinto orden que lo afecta. La gráfica (b), se puede ver como el sistema realiza una correcta detección de secuencia de voltaje y mitiga los armónicos dando una señal más limpia. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En esta gráfica se puede ver que el sistema estima de manera

correcta la magnitud. La gráfica (d) muestra que la frecuencia sufre ligeras oscilaciones de aproximadamente $\pm 0.20\text{Hz}$, esto demuestra la eficacia del sistema al detectar frecuencia.

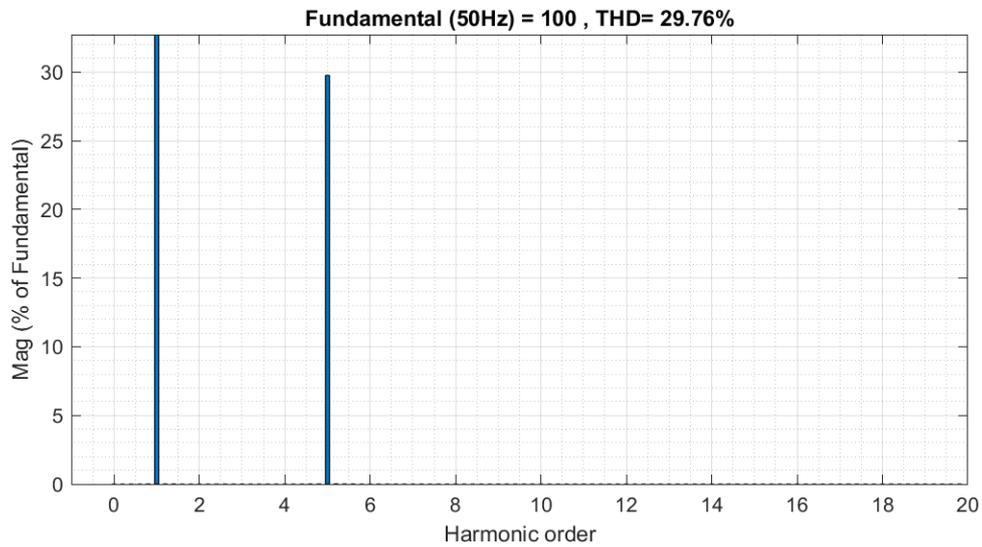


Figura 3.6: Análisis FFT realizado a la señal de entrada.

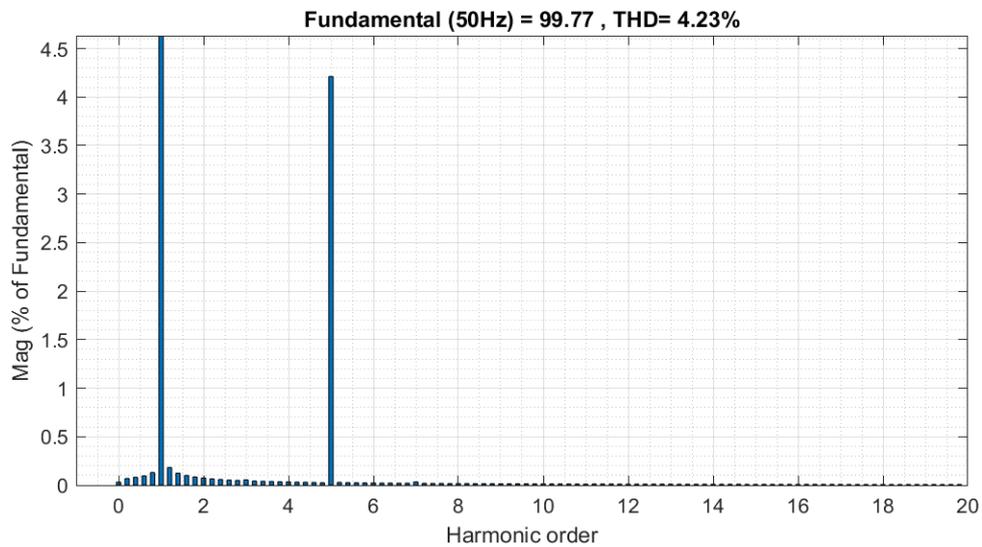


Figura 3.7: Análisis FFT realizado a la señal de salida.

Las Fig. 3.6 y 3.7 muestran el THD para la señal de entrada y salida respectivamente. El

la Fig. 3.6. se puede observar que el mayor armónico tiene una magnitud de 100 y el THD es 29.76% debido al armónico de quinto orden. En la Fig. 3.7 el mayor armónico tiene una magnitud de 99.77, y el THD es 4.23%, comprobando la buena respuesta del sistema.

3.1.2.3. Armónico de Séptimo Orden

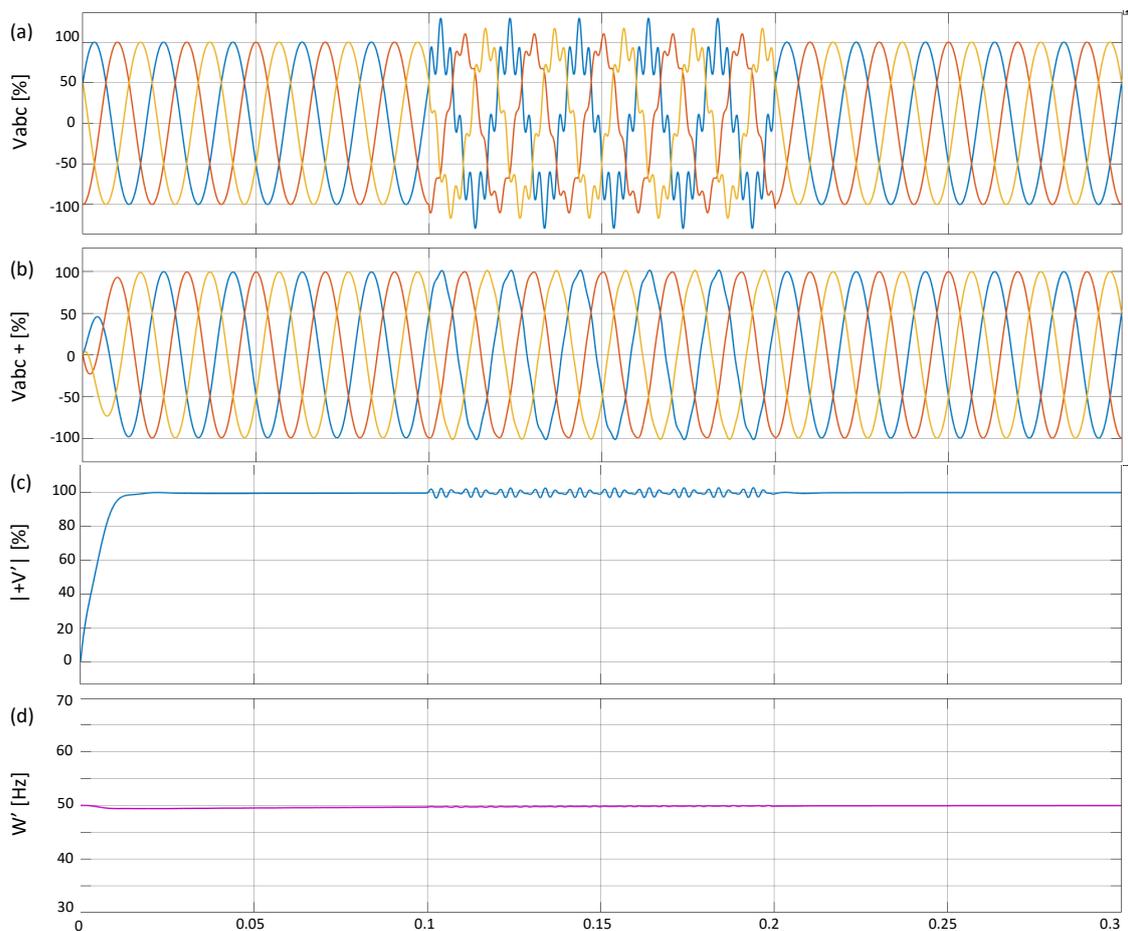


Figura 3.8: Presencia de un armónico de séptimo orden.

En la gráfica (a) se representa el voltaje de entrada en el marco de referencia natural. Como se puede ver, es evidente el armónico de séptimo orden que lo afecta. La gráfica (b), se puede

ver como el sistema realiza una correcta detección de secuencia de voltaje y mitiga los armónicos dando una señal más limpia. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En este se puede ver que presenta ligeras oscilaciones que el armónico provoca. La gráfica (d) muestra que la frecuencia sufre ligeras oscilaciones de aproximadamente $\pm 0.15\text{Hz}$, a comparación de la figura 3.5. en donde se aprecia mayor oscilación. Esto demuestra la eficacia del sistema al detectar la frecuencia incluso al presentar un armónico superior.

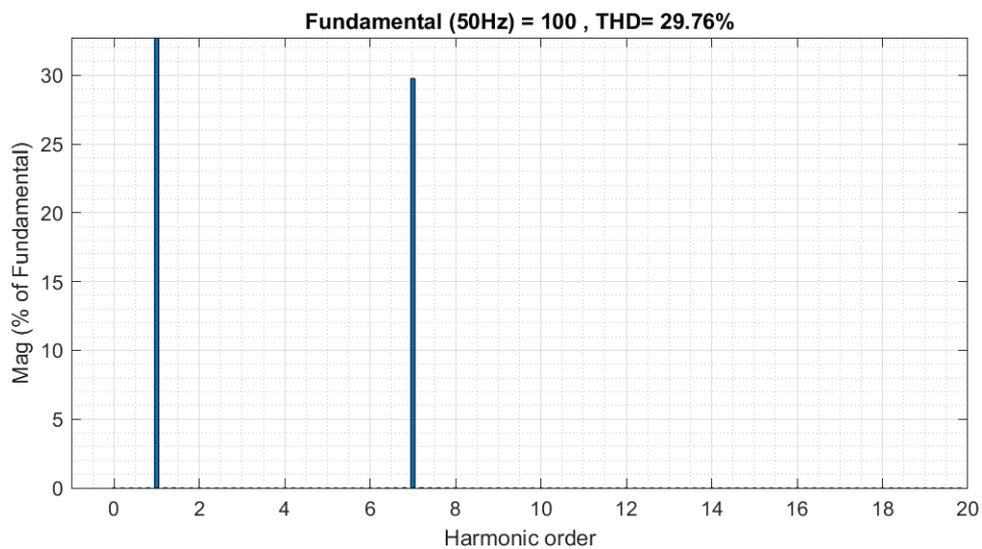


Figura 3.9: Análisis FFT realizado a la señal de entrada.

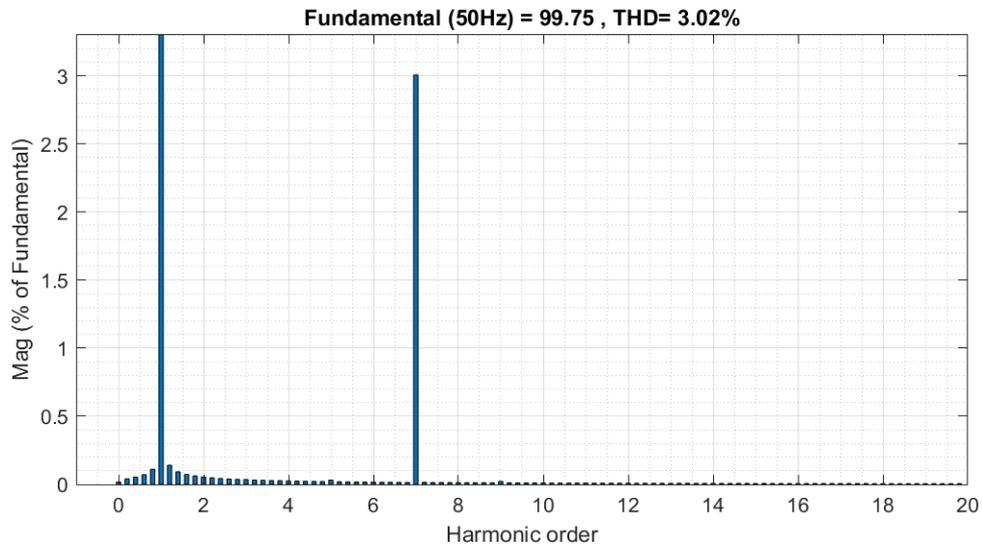


Figura 3.10: Análisis FFT realizado a la señal de salida.

Las Fig. 3.9 y 3.10 muestran el THD para la señal de entrada y salida respectivamente. En la Fig. 3.9. se puede observar que el mayor armónico tiene una magnitud de 100 y el THD es 29.76% debido al armónico de séptimo orden. En la Fig. 3.10 el mayor armónico tiene una magnitud de 99.75, y el THD es 3.02%, comprobando que el sistema trabaja mejor con armónicos de nivel mayor.

3.1.3. Caída de Voltaje

A continuación se probará la respuesta del DSOGI-QSG-FLL ante una caída de voltaje desbalanceado del 20%, en el tiempo $t=0.1s$ y $t=0.2s$. Quedando una amplitud máxima de 80% durante el desbalance.

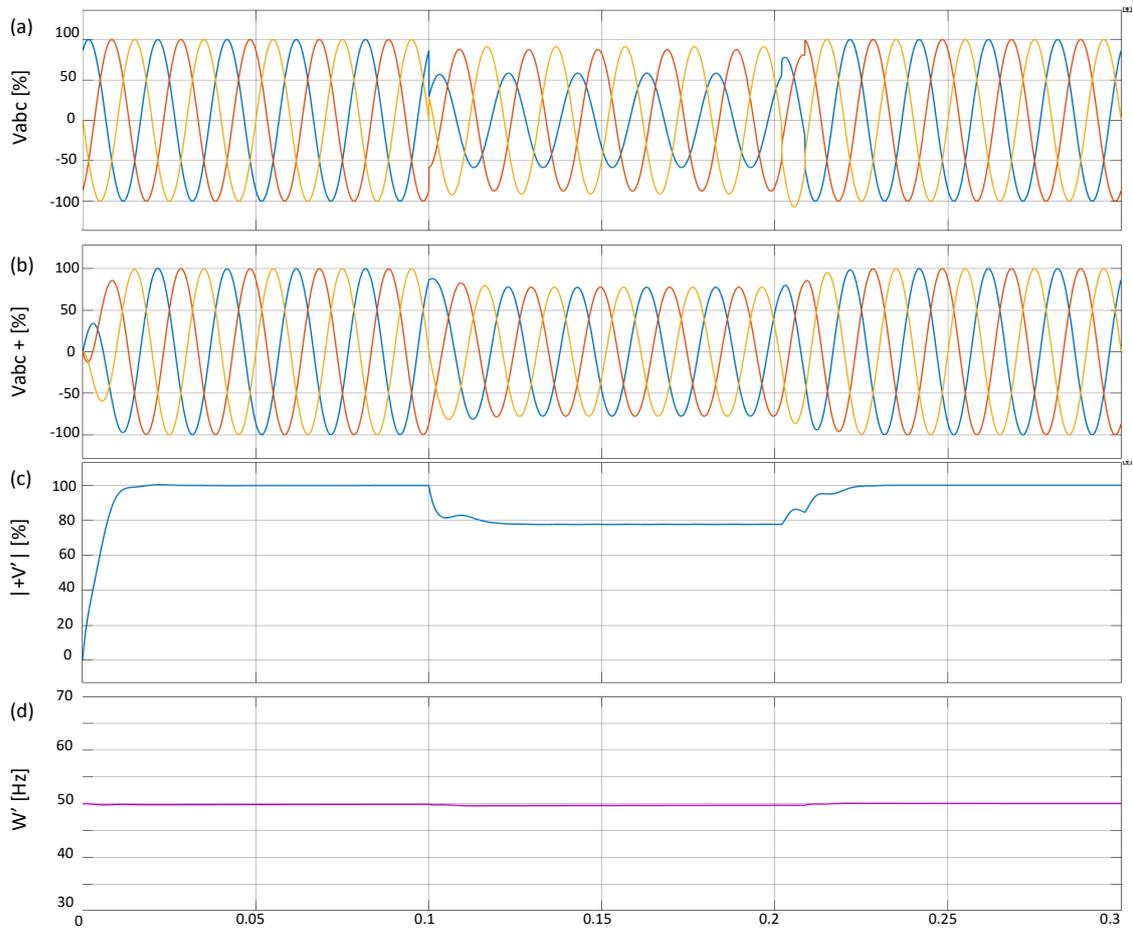


Figura 3.11: Caída de voltaje desbalanceado del 20%

En la gráfica (a) se representa el voltaje de entrada en el marco de referencia natural abc. Como se puede ver, es evidente la caída de voltaje desbalanceado de 20%. La gráfica (b), se puede ver que el sistema hace una correcta detección de secuencia de voltaje. El sistema equilibra el voltaje durante esta caída. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En este se puede ver que la magnitud decae un 20%. La gráfica (d) muestra que la frecuencia sufre ligeros desbalances y se restablece rápidamente una vez culminado la caída de voltaje.

3.1.4. Perturbación Múltiple

Ahora se probará la respuesta del DSOGI-QSG-FLL ante diversas perturbaciones como; un caída de voltaje de 20 %, un armónico de séptimo orden y un cambio en la frecuencia en $t=0.1s$ a $t=0.2s$. [4]

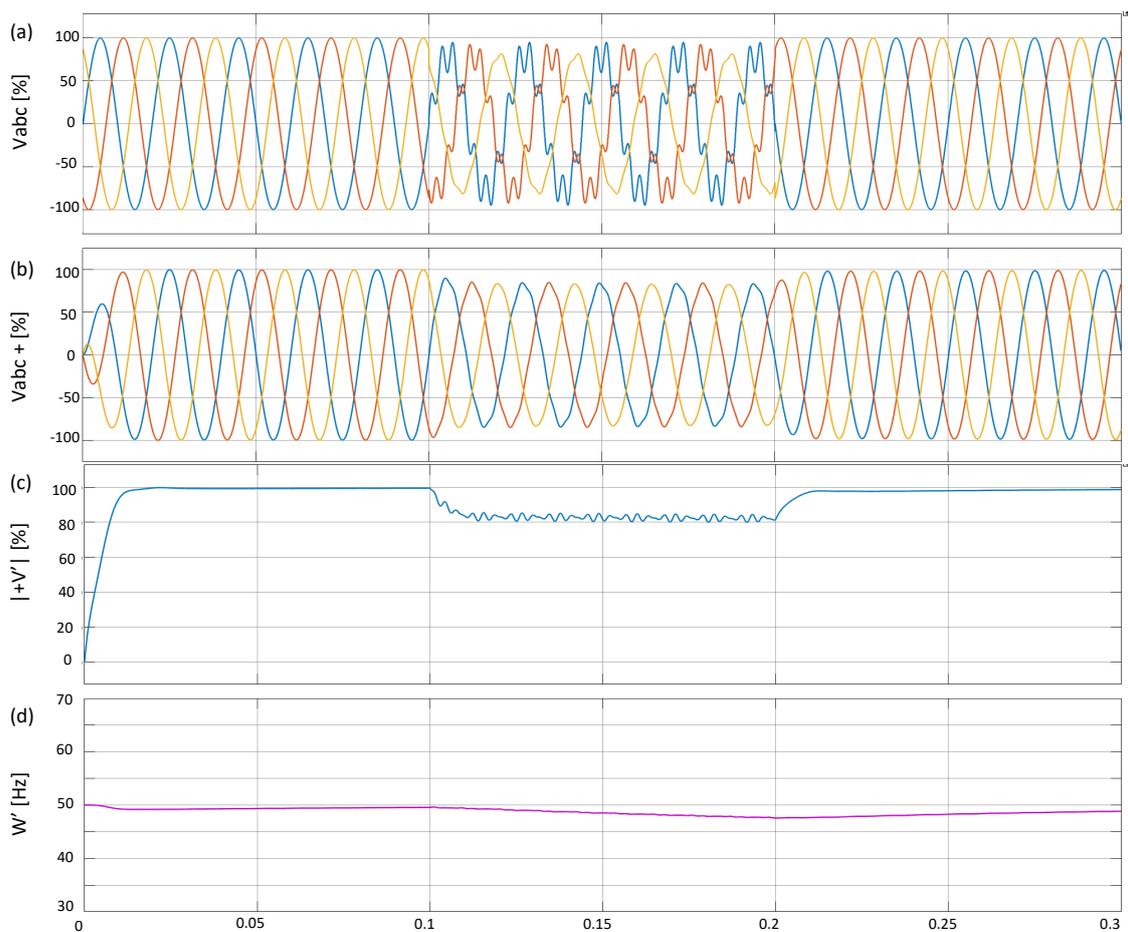


Figura 3.12: DSOGI-QSG-FLL frente a una perturbación múltiple.

En la gráfica (a) se pueden ver las diferentes perturbaciones aplicadas a la señal de entrada. La gráfica (b), se puede ver que el sistema hace una correcta detección de secuencia de voltaje y

da una señal más limpia. La gráfica (c) representa la magnitud del voltaje de secuencia positiva. En este se puede ver que la magnitud decae un 20% y tiene oscilaciones debido al armónico de séptimo orden. La gráfica (d) muestra la evolución de la frecuencia que es detectada por el FLL. Se puede ver que logra superar el salto de frecuencia sin oscilaciones. En general se puede observar que el sistema realiza una correcta detección de secuencia de voltaje, detecta la magnitud y la frecuencia incluso cuando al voltaje de entrada lo afectan distintas perturbaciones.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este apartado se describen las las conclusiones respecto de este trabajo de grado y el desarrollo que se puede realizar en el futuro.

4.1. Conclusiones

Este trabajo se lo ha realizado haciendo uso de técnicas bien conocidas, como los bloques: FLL que consigue adaptar la frecuencia de la red y no usa cálculos trigonométricos. El DSOGI-QSG que ayuda a mitigar los armónicos y el CSP que se basa en el método ISC. Todo esto se lo realizado con el fin de realizar la detección de secuencia de voltaje de un voltaje entrante que sufre diferentes perturbaciones. El desempeño del sistema de detección de secuencia ha sido probado con distintas perturbaciones que afectan a la red, dando buenos resultados.

La revisión literaria nos dejó ver que uno de los métodos más utilizados es el uso de PLLs, pero estos requieren mayor cálculos y por ende mayor carga computacional. Por eso se optó por el uso de un FLL en lugar de un PLL ya que es un sistema más simple, pero da buenos resultados.

Como se puede ver en la figura 2.7. para realizar el algoritmo se utilizó principalmente tres bloques principales, los cuales son: 1) el SOGI-QSG con el cual se obtiene las señales en cuadratura, 2) el CSP que hace la detección de secuencia positiva del sistema y 3) el FLL que hace que el sistema sea adaptable a la frecuencia sin la necesidad de implicar al ángulo de fase. Todo esto ayuda a superar los inconvenientes de un voltaje de red defectuoso.

Como se pudo observar en la figura 3.12. el DSOGI-QSG-FLL sometido a a diferentes perturbaciones trabaja de manera confiable. Este se adapta a la frecuencia y lo hace más estable debido a que la frecuencia no sufre grandes cambios como lo hace el ángulo de fase al usar un PLL. Este realiza una detección correcta del componente de secuencia positiva, y para los armónicos de orden alto, los mitiga dando así, una señal mas pura al sistema.

4.2. Trabajo Futuro

- Se puede realizar la implementación física del algoritmo para ser usado en una microrred de bajo costo. Se tendría que usar una fuente de energía de corriente alterna programable para simular las perturbaciones que sufre la red. El algoritmo puede ser probado para realizar el siguiente paso el cual es la sincronización de convertidores de potencia en una microrred. Se puede analizar su respuesta al momento de hacer la detección de secuencia de voltaje para mejorarlo si fuere el caso.

Anexos

Anexo A

Enlace para descarga de archivos

A continuación se presenta el enlace de descarga en donde se encuentran las diferentes simulaciones realizadas.

<https://github.com/AlfredoChinli/Deteccion-de-secuencia>

Bibliografía

- [1] J. Miret, J. García de Vicuña, R. Guzmán, A. Camacho, and M. Moradi Ghahderijani, “A Flexible Experimental Laboratory for Distributed Generation Networks Based on Power Inverters,” *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1589, Oct. 2017, doi: 10.3390/en10101589.
- [2] D. Serrano, “Análisis Comparativo de Técnicas de Sincronización con la Red Eléctrica ,” Universidad de Sevilla, Julio 2014.
- [3] R. Naidoo, P. Pillay, J. Visser, R. C. Bansal, y N. T. Mbungu, “An adaptive method of symmetrical component estimation”, *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 45-55, may 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.01.003.
- [4] P. Rodríguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. V. Timbus, M. Liserre, y F. Blaabjerg, “New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions”, en *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, jun. 2006, pp. 1-7. doi: 10.1109/pesc.2006.1712059.
- [5] P. Rodriguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, y F. Blaabjerg, “Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions”, en *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, nov. 2006, pp. 5173-5178. doi: 10.1109/IECON.2006.347807.
- [6] J. Matas, M. Castilla, J. Miret, L. García de Vicuña, y R. Guzman, “An Adaptive Prefiltering Method to Improve the Speed/Accuracy Tradeoff of Voltage Sequence Detection

- Methods Under Adverse Grid Conditions”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, n.o 5, pp. 2139-2151, may 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2274414.
- [7] H. Yi, X. Wang, F. Blaabjerg, y F. Zhuo, “Impedance Analysis of SOGI-FLL-Based Grid Synchronization”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, n.o 10, pp. 7409-7413, oct. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2673866.
- [8] H. E. P. de Souza, F. Bradaschia, F. A. S. Neves, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, y J. P. de Arruda, “A Method for Extracting the Fundamental-Frequency Positive-Sequence Voltage Vector Based on Simple Mathematical Transformations”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, n.o 5, pp. 1539-1547, may 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2009525.
- [9] J. A. M. Neto, L. Lovisollo, B. W. França, y M. Aredes, “Robust positive-sequence detector algorithm”, en 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, nov. 2009, pp. 788-793. doi: 10.1109/IECON.2009.5415020.
- [10] C. Subramanian y R. Kanagaraj, “Rapid Tracking of Grid Variables Using Prefiltered Synchronous Reference Frame PLL”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, n.o 7, pp. 1826-1836, jul. 2015, doi: 10.1109/TIM.2014.2366275.
- [11] P. Rodríguez, A. Luna, R. S. Muñoz-Aguilar, I. Etxeberria-Otadui, R. Teodorescu, y F. Blaabjerg, “A Stationary Reference Frame Grid Synchronization System for Three-Phase Grid-Connected Power Converters Under Adverse Grid Conditions”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, n.o 1, pp. 99-112, ene. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2159242.
- [12] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Mujal, R. Teodorescu, y F. Blaabjerg, “Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, n.o 1, pp. 127-138, ene. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2042420.

- [13] E. Robles, J. Pou, S. Ceballos, J. Zaragoza, J. L. Martín, y P. Ibañez, “Frequency-Adaptive Stationary-Reference-Frame Grid Voltage Sequence Detector for Distributed Generation Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n.o 9, pp. 4275-4287, sep. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2098352.
- [14] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, L. G. de Vicuña, y R. Guzman, “Positive and Negative Sequence Control Strategies to Maximize the Voltage Support in Resistive–Inductive Grids During Grid Faults”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, n.o 6, pp. 5362-5373, jun. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2732452.
- [15] “Detectores de secuencia positiva para la conexión de turbinas eólicas a la red”. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/97706> (accedido 11 de julio de 2022).
- [16] M. Saitou, N. Matsui, y T. Shimizu, “A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation”, en *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, oct. 2003, vol. 2, pp. 1222-1227 vol.2. doi: 10.1109/IAS.2003.1257706.
- [17] S. M. Silva, B. M. Lopes, B. J. C. Filho, R. P. Campana, y W. C. Bosventura, “Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems”, en *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, oct. 2004, vol. 4, pp. 2259-2263 vol.4. doi: 10.1109/IAS.2004.1348790.
- [18] W. V. Lyon, *Application of the Method of Symmetrical Components*, New York: McGraw-Hill, 1937.
- [19] J. B. Solano, J. F. P. Suárez, G. O. Plata, y V. B. Núñez, “Caracterización, identificación y localización de huecos de tensión: revisión del estado del arte”, *Ingeniería y Ciencia*, vol. 8, n.o 15, pp. 191-220, 2012.
- [20] V. Cardona Sánchez y C. C. Cardona Bedoya, “Control de un convertidor DC-AC para la integración de generación distribuida a la red eléctrica en condición

de desbalance”, 2016, Accedido: 11 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://hdl.handle.net/11059/6134>

- [21] I. F II, “IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”, New York, NY, USA, pp. 1-1, 1993.