



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA
AUTOAJUSTABLE PARA APLICACIÓN RESIDENCIAL**

FABIAN ESNEIDER UNIBIO

**DIRECTOR:
M.Sc. LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
16-DICIEMBRE-2021**

FABIAN ESNEIDER UNIBIO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:
M.Sc. LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
16-DICIEMBRE-2021**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre Alejandrina que con su paciencia y apoyo me impulsó a seguir adelante, por estar conmigo en las etapas difíciles, por llenar mi vida con sus sabios y valiosos consejos

“por ser incondicional conmigo te amo madre”.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por ser uno de mis pilares fundamentales y haberme apoyado durante las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

A cada docente de la facultad de ingeniería y arquitecturas que influyeron en mi formación, en especial a mi director de trabajo de grado, M.Sc. Luis David Pabón Fernández por encaminar esta investigación y formar parte de este objetivo alcanzado.

A mis compañeros de estudio Edwin, Darwin, Oscar quienes ofrecieron su paciencia y conocimientos para ayudarme a crecer, a Daniela Villamizar con quien he compartido momentos esenciales para mi desarrollo, demostrando amistad incondicional, siendo tolerante en situaciones profesionales y personales de pequeños conflictos de interés.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.2 BASES CONCEPTUALES	19
4.2.1 TIPOS DE POTENCIAS	19
4.2.2 COMPENSACIÓN REACTIVA	22
4.2.3 INVERSOR	28
4.2.4 TIPOS DE CARGA	28
4.2.5 TRANSFORMACIÓN DE CLARKE Y PARK	31
5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN APLICACIONES RESIDENCIALES	32
5.1. PRINCIPIOS DE COMPENSACIÓN.....	32
5.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	33
5.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE CA FLEXIBLE - FACTS (Flexible AC Transmission System)	37
5.4 TIPOS DE COMPENSADORES.....	38
6. TOPOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE COMPENSACIÓN.	43

6.1 CLASIFICACIÓN BASADA EN TOPOLOGÍA	43
6.1.2 TOPOLOGÍA VSI PUENTE-H.....	44
6.1.3 TOPOLOGÍA TRIFÁSICA DE CUATRO HILOS CONECTADA EN ESTRELLA	45
6.1.4 TOPOLOGÍA VSI TRIFÁSICA CON ENCLAVAMIENTO DE NEUTRO	46
6.1.5 TOPOLOGÍA VSI TRIFÁSICA DE CUATRO RAMAS.....	47
6.1.6 TOPOLOGÍA VSC AISLADO DE DOS RAMAS	48
6.1.7 TOPOLOGÍA SIN VSC AISLADO SIN TRANSFORMADOR	48
7. MODELADO DEL SISTEMA EN UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN	49
7.1 SISTEMA MONOFÁSICO	49
7.2 SISTEMA TRIFÁSICO VIRTUAL	50
7.2.1 SINCRONÍA CON LA RED	51
7.3 TRANSFORMACIÓN DE CLARKE Y PARK	53
7.3.1 CLARKE	53
7.3.2 PARK.....	54
7.4 INVERSA DE CLARKE Y PARK	56
7.5 GENERADOR DE PULSOS PWM DE DOS NIVELES	57
7.6 SISTEMA DE CONTROL LAZO CERRADO	58
7.7 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO MONOFÁSICA.....	59
8. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CARGA	60
8.1 ESQUEMA SIMULACIÓN	60
8.2 ESCENARIOS DE CARGA	61
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CARGAS.	62

9.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA MONOFÁSICO SIN PROTOTIPO	63
9.1.1 POTENCIA ACTIVA DE LA CARGA.....	63
9.1.2 POTENCIA REACTIVA DE LA CARGA.....	64
9.1.3 FACTOR DE POTENCIA.....	65
9.1.4 PERFIL DE TENSIÓN DE LA RED.....	65
9.1.5 PERFIL DE CORRIENTES DE LA RED Y CARGA	66
9.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA MONOFÁSICO CON PROTOTIPO	67
9.2.1 POTENCIA ACTIVA DEL SISTEMA.....	67
9.2.2 POTENCIA REACTIVA DEL SISTEMA	68
9.2.3 FACTOR DE POTENCIA.....	70
9.2.3 COMPENSACIÓN DEL SISTEMA	72
10. SISTEMAS BIFÁSICO Y TRIFÁSICO.....	76
10.1 ANÁLISIS CON CARGA BIFÁSICA	76
10.2 ANÁLISIS EN LOS SISTEMA RESIDENCIALES TRIFÁSICO	78
11.COMPARACIÓN EN SISTEMAS MONOFÁSICOS BIFÁSICO Y TRIFÁSICO.	80
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
13. BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valores respectivos de cada carga.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 2. Comparación simulaciones.</i>	<i>81</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Triángulo de potencia</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 Compensación individual.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3 Compensación por grupos.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4. Compensación central.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 Armónicos.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6. Ángulo de desfase entre la corriente y voltaje la en cargas resistivas. ..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente en cargas resistivas..</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8. Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente en cargas capacitivas.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Marcos de referencia - Transformaciones Clarke y Park.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. Configuración de capacitor en derivación.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11. Configuración de capacitor en serie.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12. filtros de armónicos: (a) sintonizados simples y (b) sintonizados dobles.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13. Filtros amortiguados: (a) de primer orden; (b) segundo orden; (c) tercer orden; y (d) tipo C.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14. Condensador síncrono o generador síncrono.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15. Tipos de FACTS.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16. Esquema de un SVC.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17. Configuración de un TSC.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18. Configuración de un TCR.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19. Configuración de un TCR.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20. Configuración de un D-STATCOM.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21. Topología de puente completo de tres fases.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22. Topología de puente-H con condensador de alimentación CC común.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Topología trifásica de cuatro hilos conectado en estrella sistema de distribución.....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 24. Topología VSI trifásica con sujeción neutra.</i>	47
<i>Figura 25. Configuración de topología que utiliza un VSI de cuatro patas.</i>	48
<i>Figura 26. Topología D-STATCOM trifásica de 4 hilos aislada de dos ramales basada en VSC.</i>	48
<i>Figura 27. Topología D-STATCOM trifásico de 4 hilos basado en VSC no aislado.</i>	49
<i>Figura 28. Topología sistema monofásico (F-N).</i>	50
<i>Figura 29. Sistema trifásico virtual (FFF).</i>	51
<i>Figura 30. Señales de voltaje trifásico virtual.</i>	51
<i>Figura 31. Bloque seguimiento de fase PLL Simulink.</i>	53
<i>Figura 32. Código en Matlab transformada de Clarke.</i>	54
<i>Figura 33. Bloque en Simulink transformada de Clarke.</i>	54
<i>Figura 34. Código en Matlab transformada de Park.</i>	55
<i>Figura 35. Bloque en Simulink transformada de Park para voltajes y corrientes.</i>	55
<i>Figura 36. Salidas de la componente I_q e I_d mediante las transformadas de Park y Clarke.</i>	56
<i>Figura 37. Código en Matlab transformada inversa de Park.</i>	56
<i>Figura 38. Código en Matlab transformada inversa de Clarke.</i>	56
<i>Figura 39. Bloque en Simulink transformada inversa de Park y Clarke para voltajes y corrientes.</i>	57
<i>Figura 40. Bloque generador de pulso PWM de la librería Simulink.</i>	58
<i>Figura 41. Bloque controlador PID.</i>	58
<i>Figura 42. Bloque en Simulink topología de puente completo monofásica.</i>	60
<i>Figura 43. Bloque en Simulink topología de puente completo monofásica con filtro RL.</i>	60
<i>Figura 44. Esquema de simulación del prototipo completo en Matlab Simulink.</i>	61
<i>Figura 45. Bloque escenarios de carga.</i>	62
<i>Figura 46. Potencia activa de la carga.</i>	63
<i>Figura 47. Potencia reactiva de la carga.</i>	64
<i>Figura 48. Factor de potencia.</i>	65

<i>Figura 49. Perfil de tensión en la red.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 50. Perfil de corriente en la red y perfil de corriente en la carga.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 51. Potencia activa de la carga y potencia activa en la red.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 52. Comparación: potencia activa sin compensación y potencia activa con compensación con prototipo.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 53. Potencia reactiva de la carga y potencia reactiva en la red.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 54. Comparación: potencia reactiva sin compensación y potencia reactiva con compensación con prototipo.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 55. Factor de potencia de la carga y factor de potencia corregido.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 56. Comparación: factor de potencia sin compensación y actor de potencia con compensación con prototipo</i>	<i>71</i>
<i>Figura 57. Comportamiento de la compensación del sistema.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 58. Comportamiento de la compensación del sistema con carga R.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 59. Comportamiento de la compensación del sistema con carga RL.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 60. Comportamiento de la compensación del sistema con carga RC.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 61. Comportamiento de la compensación del sistema con carga L.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 62. carga bifásica con prototipo.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 63. factor de potencia por fase L1 Y L2.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 64. Carga bifásica y monofásica con prototipo.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 65. factor de potencia por fase con carga monofásica.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 66. Cargas bifásicas con prototipos en instalaciones trifásicas.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 67. factor de potencia por fase L1, L2 Y L3.</i>	<i>79</i>

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó un prototipo de compensador reactivo autoajustable para aplicaciones residenciales monofásicas mediante la simulación en el programa Matlab®, donde se inició por profundizar en el estado del arte acerca de las técnicas utilizadas para compensación de energía reactiva, en la cual se determina una topología a utilizar en el prototipo y de igual manera se desarrolló una estrategia de control modelando el sistema en el entorno de diagrama de bloques Simulink debido a que, este permite generación de códigos automáticos, y se finalizó con la implementación de diferentes escenarios de carga realizando los análisis correspondientes.

Palabras claves: potencia reactiva, compensación, control, D-statcom, simulación.

ABSTRACT

In this project, a self-adjusting reactive compensator prototype was developed for single-phase residential applications through simulation in the Matlab® program, where it began by delving into the state of the art about the techniques used for reactive energy compensation, in which It determines a topology to be used in the prototype and in the same way a control strategy was developed modeling the system in the Simulink block diagram environment because it allows the generation of automatic codes, and it was completed with the implementation of different load scenarios. performing the corresponding analyses.

Keywords: reactive power, compensation, control, D-statcom, simulation.

IMPACTO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación permite poner a disposición textos para la literatura enfocada a la calidad de la energía con impactando directo a la comunidad investigativa de la región, en cuanto al campo económico, será positivo tanto como para el usuario como el operador de red, en el momento que un dispositivo como es el prototipo de compensación expuesto en el siguiente trabajo se implemente, el operador de red podría en teoría mitigar gastos en mantenimiento en los sistemas de distribución producidos por las micro energías reactivas, el usuario reduciría el valor del servicio al generar su propia potencia reactiva, esto repercute en el medio ambiente al momento de requerir menos recurso para suministrar una misma potencia útil a los sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

En la modernidad los sistemas eléctricos de potencia se han ido actualizando, debido a que los clientes así lo requieren. La calidad de la energía ha sido un tema que ha cobrado gran relevancia para los investigadores y entre en uno de ellos está mejorar el rendimiento de la red con respecto a la potencia reactiva en razón de que, esta energía tiene implicaciones como por ejemplo la disminución de la capacidad de transporte de potencia activa y así mismo, el aumento de pérdidas en el sistema entre otros. Ahora bien, durante los últimos años los operadores de red que son los encargados del transporte y distribución de la energía eléctrica han endurecido las penalizaciones a las industrias porque son los mayores consumidores de reactivos, esto a causa de que contienen máquinas que utilizan inductores y capacitancias que realizan la conversión de energía eléctrica en campos magnéticos. Por otro lado, se han creado dispositivos para dar solución a la energía reactiva que se han enfocado en sistemas de tres hilos que son los usados para los usuarios de uso comercial e industrial.

No obstante, los operadores de red no están realizando cobros por reactivos a clientes de niveles de tensión residencial (nivel de tensión 1), debido a que la mayoría de consumidores cuentan con medidores desactualizados, es por ello que se ha empezado a cambiar estos equipos y a ser reemplazados por medidores inteligentes que calibran los cuatro cuadrantes y que podrán estimar esta energía [1]. Esta sustitución de dispositivos genera un problema y es el aumento en la factura y aunque en uso residencial la potencia reactiva es muy baja es considerable, es por ello que nace la iniciativa de diseñar un prototipo que se ajuste a las características residenciales, y que sea un dispositivo de bajo costo que pueda ser adquirido por la población.

Este diseño se planteó en etapas donde principalmente se realizó una búsqueda a profundidad de los temas relevantes con respecto a la compensación de reactivos, en donde se evidencia la poca información con respecto a dispositivos encaminados a la compensación residencial monofásica, por ende, se basó la investigación en fundamentos de sistemas trifásicos utilizando como referente un equipo D-STATCOM.

Se identifican las técnicas más habituales en sistemas trifásicos, tomando como referencia la técnica en derivación shunt ya que esta permite la conexión en paralelo del equipo para la manipulación de corrientes que se inyectan al sistema, realizando una síntesis de las tipologías tales como la utilización de un puente H completo monofásico, puente completo de tres hilos, vsi aislada de dos ramas entre otras, y a partir de esto estableciendo un sistema de control basado en la rotación de campos magnético de máquinas síncronas utilizando la teoría de clarke y park para encontrar una corriente que nos permita mejorar el fp , modelando sobre la base de dicha corriente pulsos pwm creando un sistema de lazo cerrado para el autoajuste del compensador al experimentar variaciones en la carga a compensar, realizando la simulación de un prototipo de compensador monofásico en el software de Matlab, se analizan los diferentes escenarios en los que podría operar el prototipo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un prototipo de compensador de energía reactiva autoajutable para aplicaciones residenciales de bajo costo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estado del arte acerca de las técnicas utilizadas para compensación de energía reactiva en aplicaciones residenciales.
- Determinar una topología a utilizar en el prototipo.
- Modelar el sistema en un software de simulación.
- Simular el prototipo frente a diferentes escenarios de carga.
- Analizar los resultados de la simulación del prototipo frente a diferentes escenarios de carga.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente se observa un crecimiento del uso de las energías alternativas en complemento con la red, en este punto los equipos utilizados para la priorización del suministro de energía como lo es un inversor inyecta potencia reactiva a la red, así mismo se presenta bajos factores de potencia debido a el contenido de los de armónicos, caídas de tensión (sags) y elevaciones de tensión (swell) en toda instalación residencial en la que se haga uso de dichas fuentes, a partir de esto se observa que la tendencia de las empresas prestadoras de energía (operadores de red) es cobrar el reactivo, por ende es necesario realizar una investigación donde se formule un acercamiento que se encamine a la compensación de reactivos de este tipo, con el fin de obtener una mejora en factor de potencia, disminuir la generación de armónicos en la red llevando un mayor rendimiento para los circuitos de distribución y reduciendo costos adicionales en la factura. El fin de este proyecto es realizar una simulación en el cual se puedan observar los efectos y encontrar un prototipo de compensación de energía reactiva de aplicación residencial especialmente monofásica en diferentes escenarios de carga [20].

4. MARCO TEÓRICO

Debido a la correlación que existe entre el siguiente proyecto y la compensación de reactivos que se inyecta la red, en diferentes áreas de la electricidad se hace necesario contextualizar una introducción a los temas, conceptos y definiciones para un mejor entendimiento del desarrollo del proyecto.

4.2 BASES CONCEPTUALES

4.2.1 TIPOS DE POTENCIAS

A continuación, se expresan los tipos de potencia que se encuentran en los sistemas eléctricos, estos se derivan a partir de aplicar la Ley de Ohm en términos de potencia, así mismo se explica la relación entre ellas mediante el triángulo de potencia.

4.2.1.1 POTENCIA ACTIVA

La potencia activa se define como la destreza de un circuito para realizar una fase de transformación en trabajo de la energía eléctrica, se origina a partir de la que la tensión está en fase con la componente de la corriente y su unidad está dada en KW o MW y se representa por la letra P.

De igual modo, se habla de demanda eléctrica, para hallar dicha demanda se usa la potencia activa que es la realmente consumida por los circuitos. Además, existen diferentes elementos eléctricos que transforman la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: lumínica, química, térmica, mecánica, etc [2].

A continuación, se muestra la expresión para hallar la potencia activa, y está dada a partir de la Ley de Ohm y el triángulo de potencia.

$$P = I \cdot V \cdot \cos(\varphi) \quad (1)$$

$$P = I^2 \cdot Z \cdot \cos(\varphi) \quad (2)$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (3)$$

4.2.1.2 POTENCIA REACTIVA

Se empieza por reconocer que no es una potencia realmente absorbida en la instalación, ya que no produce trabajo provechoso, es decir, su valor promedio es nulo [1]. De igual manera, en su defecto se crean desfases entre la corriente y voltaje. Esta potencia aparece en una instalación eléctrica en la que se emplean bobinas, condensadores u/o en otro contexto todo tipo de aparato electrónico, y es la responsable de crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes. Se representa por Q y su unidad son los voltamperios reactivos (VAR) [2]. Con lo anterior se puede describir que la potencia reactiva es una componente de la potencia aparente (S) y se describe con la siguiente ecuación:

$$Q = I \cdot V \cdot \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$Q = I^2 \cdot Z \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (6)$$

4.2.1.3 POTENCIA APARENTE

La potencia aparente o conocida también como potencia compleja de un circuito de corriente alterna se define como la suma de potencias circundantes en el circuito al ser la potencia total, es el vector resultante de sumar la potencia reactiva la y potencia activa, se representa con la letra S. La potencia aparente no es la realmente consumida o útil, sin embargo, cuando el factor de potencia es igual a 1 ($\cos \varphi=1$) esta sería exactamente igual a la potencia activa [2]. A continuación, se describe la ecuación para hallar la potencia aparente:

$$S=I*V \quad (7)$$

4.2.1.4 TRIÁNGULO DE POTENCIA

La potencia aparente, real y reactiva entregadas a un circuito eléctrico se relacionan por el triángulo de potencia. El lado opuesto al ángulo es la potencia reactiva Q suministrada o recibida según la carga, el lado adyacente al ángulo de este triángulo es la potencia activa P suministrada a la carga, y la hipotenusa del triángulo es la potencia aparente S de la carga. El triángulo de potencia otorga una mejor relación entre el factor de potencia, la potencia reactiva, la potencia real, y la potencia aparente, al establecerse el valor de alguna de estas variables da paso de manera simple de calcular distintas cantidades relacionadas a partir de una con la utilización de álgebra básica [3].

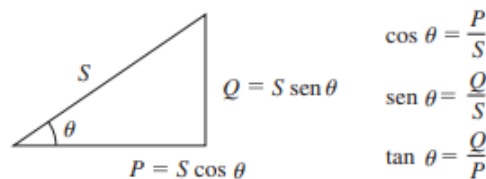


Figura 1. Triángulo de potencia Fuente: tomado de [3].

4.2.1.4 FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se describe como la razón de la potencia activa total (W) a la potencia aparente total (VA) de la onda compuesta, que a su vez incluye todas las componentes armónicas. Debido a estas, el factor de potencia de desplazamiento es mayor que el factor de potencia total (componente fundamental), ya que, la presencia de armónicas tiende a aumentar el desfase entre las formas de onda compuestas de corriente y voltaje [4].

4.2.2 COMPENSACIÓN REACTIVA

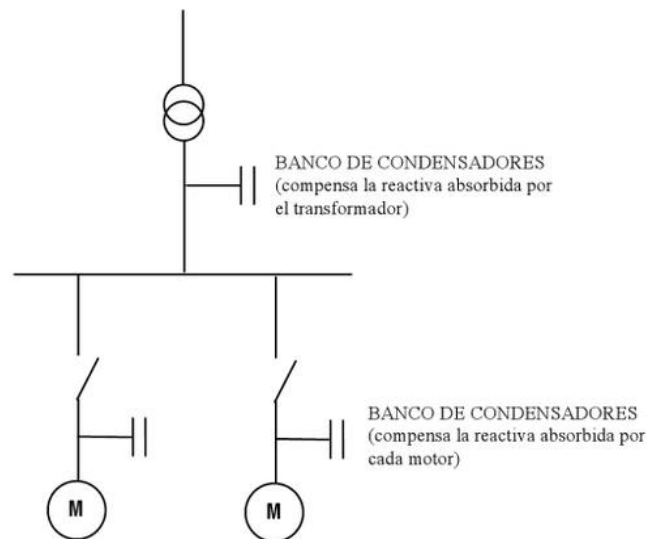
La compensación de potencia reactiva se define como el proceso para mejorar rendimiento y eficiencia de los sistemas de potencia de corriente alterna (CA). Así, el problema de la compensación de potencia reactiva está relacionado con el soporte de carga y voltaje. Los objetivos en las cargas son aumentar el valor del factor de potencia igual a uno del sistema, y de igual manera equilibrar la potencia real extraída del suministro de CA, mejorar la regulación de voltaje y eliminar los componentes armónicos de corriente producidos por cargas industriales no lineales grandes y fluctuantes. En el voltaje generalmente se requiere para reducir la fluctuación de voltaje en un terminal dado de una línea de transmisión. La compensación de potencia reactiva en los sistemas de transmisión también mejora la estabilidad del sistema de CA al aumentar la potencia activa máxima que se puede transmitir [5].

4.2.2.1 TIPOS DE COMPENSACIÓN REACTIVA

La compensación de energía reactiva puede ser de tres tipos: compensación individual, compensación por grupos y compensación central, esta última se caracteriza por trabajar con sistema automático de regulación.

4.2.2.2 COMPENSACIÓN INDIVIDUAL

En este tipo de compensación los capacitores se acoplan directamente a los equipos cuyo factor de potencia se quiere mejorar y su aplicación es bastante relevante en cargas grandes como por ejemplo hornos de inducción, motores de bomba. Este tipo de cargas se caracterizan porque se mantienen conectadas mucho tiempo, otra ventaja que se tiene es la disminución de pérdidas por efecto de Joule en los cables debido a que disminuyen considerablemente con este tipo de compensación [6].



. Figura 2 Compensación individual. Fuente: tomado de [6].

4.2.2.3 COMPENSACIÓN POR GRUPOS

La compensación por grupos se caracteriza por compensar los reactivos con un grupo común, es decir, cuando existen grupos pequeños de consumidores que

están conectados conjuntamente. De igual manera, este tipo de compensación reduce las pérdidas por efecto Joule, pero no tanto como en el caso anterior [6].

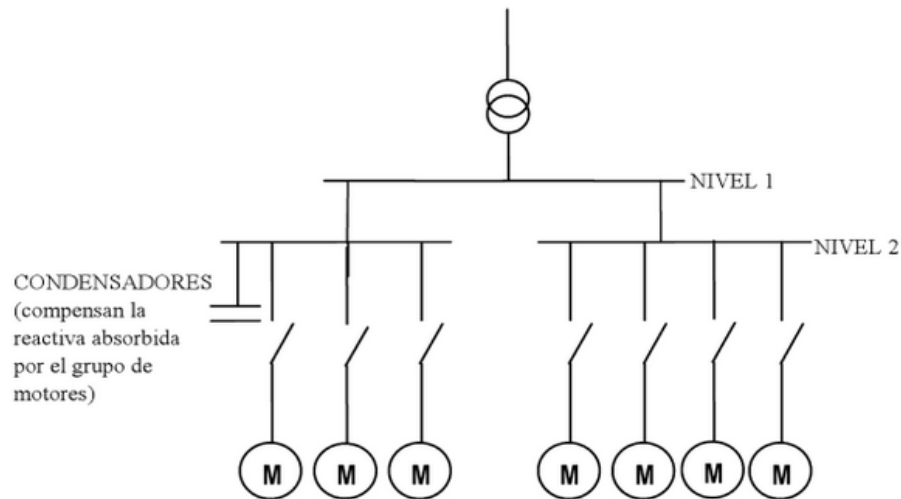


Figura 3 Compensación por grupos. Fuente: tomado de [6].

4.2.2.4 COMPENSACIÓN CENTRAL CON SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN

En las instalaciones con una gran cantidad de usuarios de potencias variables y conexión cambiables se usan baterías de condensadores con una regulación que en cada momento desconecta o conecta a partir de contactores y de forma automática, con ello los condensadores necesarios se adaptan a la demanda de potencia reactiva que existe en cada momento. Cuando las fluctuaciones en las instalaciones son altas y rápidas la conexión por medio de contactores estos no permiten actuar lo suficientemente veloz para tener en cada instante la compensación necesaria, y de ahí se da la decisión de aplicar conmutadores estáticos como: tiristores para la desconexión y conexión de los capacitores [6].

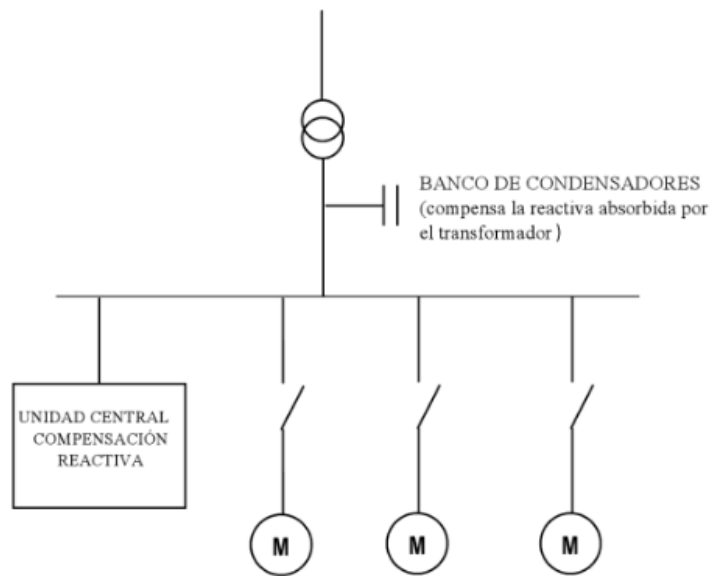


Figura 4. Compensación central. Fuente: tomado de [6].

4.2.2.5 EFECTOS DE LA COMPENSACIÓN

Los efectos de la compensación se derivan a partir de la necesidad de las cargas de consumir potencia reactiva, ya que, tienen que consumir una mayor corriente que la necesaria para obtener la potencia activa, si la potencia reactiva se extrae desde la generación conlleva a que se tiene que transportar por las líneas de transmisión y de igual manera por el sistema de distribución por las que se envía la potencia activa. En ese orden de ideas las instalaciones tendrían que ser calculadas con arreglo, es decir, la adición de la potencia reactiva más la activa que da como resultado la potencia aparente [6].

Al ser la potencia aparente mayor que la activa tiene resultados significativos como:

- Mayores costos de instalación debido a: mayor capacidad en los conductores y transformadores.
- Mayores pérdidas en la red.

- Aumento en el costo de la factura de energía eléctrica.

4.2.2.6 SOLUCIONES DE LA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA

4.2.2.6.1 REDUCCIÓN DE LA FACTURA ELÉCTRICA

Los operadores de red penalizan el consumo de energía reactiva cobrando este término en las facturas de energía eléctrica. En Colombia el ente que regula este tipo de cobro es la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) que tiene como finalidad mejorar la prestación y eficiencia del servicio de energía, para ello estableció la resolución CREG 015 de 2018 - capítulo 12 en la cual indicó la forma en la que se debe calcular el valor a cobrar por penalización de reactivos [7]. La norma se divide en los dos grupos siguientes:

- Grupo 1: cuando el exceso de traslado de energía reactiva se presenta sobre el límite durante cualquier tiempo de 10 días o menos en un mismo mes. La CREG indica que se debe realizar el cobro del total de la energía reactiva tanto inductiva como la capacitiva. La variable M es igual a 1 [7].
- Grupo 2: cuando el exceso de traslado de energía reactiva sobre el límite se presente durante periodo por más o menos de 10 días en un mismo mes. La variable M será igual a 1 durante los doce primeros meses en los que se presente esta casualidad y a partir del décimo tercer mes del transporte de reactivos con la misma situación la variable aumentará cada mes de uno en uno hasta llegar al valor de 12. Si la condición se pierde durante más de seis meses consecutivos las variables se recomienzan a partir de 1 [7].

A continuación, se presenta la fórmula que se debe aplicar para penalización de reactivos

$$CTER = ER \cdot VCD \cdot M \quad (8)$$

Donde:

CTER: costo de traslado de energía reactiva.

ER: cantidad de energía transportada (dato aportado por el medidor).

VCD: valor por cargo de distribución (valor de acuerdo al nivel de tensión)

M: variable entre 1 y 2 asociada con el tiempo mensual en el que se presenta el porte de reactivos sobre el límite establecido.

4.2.2.6.2 REDUCCIÓN DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES

Debido a la compensación de reactivos la intensidad resultante de la instalación disminuye, gracias a ellos la sección de los conductores puede disminuir.

4.2.2.6.3 DISMINUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS

4.2.2.6.3.1 REDUCCIÓN DE LAS CAÍDAS DE TENSIÓN

La reducción de las caídas de tensión se da aguas arriba del equipo de compensación, esto se puede dar a partir de las corrientes distorsionadas que están armados por una componente principal o fundamental de 50 o 60 Hz, más una repetición de corrientes unas sobre otras de frecuencia con múltiplos de la fundamental, que se denomina armónicos. Los armónicos se generan a partir de la existencia de las cargas no lineales en una instalación eléctrica, como: rectificadores, hornos, reguladores electrónicos entre otros. Además, los armónicos pueden aparecer en la tensión o la corriente [6].

Los armónicos en una red pueden ocasionar dificultades como:

- Aumento de las pérdidas de la instalación.
- Parpadeo del alumbrado.

- Averías frecuentes en los equipos eléctricos.

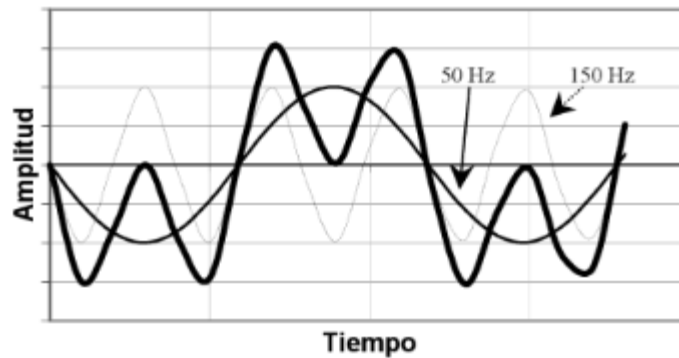


Figura 5 Armónicos. Fuente: tomado de [6].

4.2.3 INVERSOR

La definición estándar de un inversor principalmente de corriente, es un equipo electrónico cuya función es cambiar a voltaje simétrico de salida de corriente alterna con la frecuencia y magnitud deseada por el cliente a partir de un voltaje de entrada de corriente continua, tales como los inversores de potencia que son convertidores electrónicos de potencia, su esencial acción es la de facilitar el canje de energía entre dos o más subsistemas y esto lo consigue mediante la transformación de señales a alternas (AC) de continuas (DC). La actividad la puede desempeñar a través de una gran diversidad de configuraciones en las que encontramos conmutadores (electrónicos) de potencia, componentes pasivos y un sistema de control que también tiene la finalidad la protección del mismo [8].

4.2.4 TIPOS DE CARGA

4.2.4.1 CARGAS RESISTIVAS

En las cargas resistivas (toda energía que se convierte en luz y calor), como los calefactores, lámparas incandescentes, resistencias de carbón; corriente y la

tensión están en fase. Para cargas resistivas el factor de potencia tiene un valor de 1. Las propiedades de estas cargas es que el ángulo medido entre el voltaje y la corriente es cero, es decir, se encuentran en fase como se observa en la figura 6 [9].

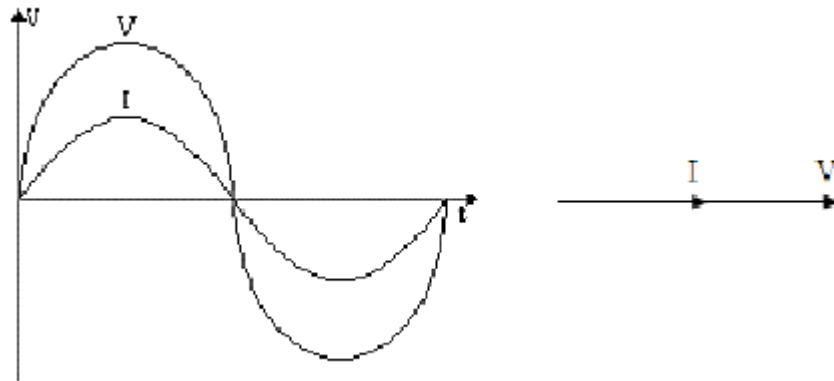


Figura 6. Ángulo de desfase entre la corriente y voltaje la en cargas resistivas. Fuente: tomado de [9].

4.2.4.2 CARGAS INDUCTIVAS

Las cargas inductivas se caracterizan por ser elementos que almacenan y consumen la energía eléctrica convirtiendo la corriente eléctrica que circula por ella en campos magnéticos, la señal generada de dicha intensidad se encuentra retrasada con respecto a la señal de voltaje, es decir, hay un desfase negativo (-90 grados) y a su vez el factor de potencia se encuentra retrasado como se ilustra en la figura 7. Ejemplo de cargas inductivas: motores y transformadores [9].

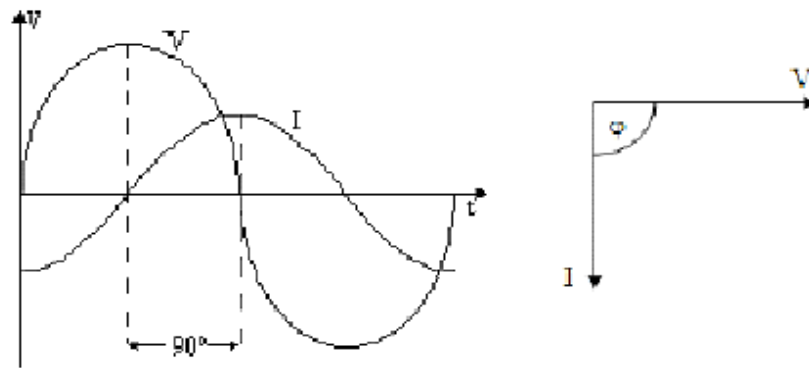


Figura 7. Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente en cargas resistivas.
Fuente: tomado de [9].

4.2.4.3 CARGAS CAPACITIVAS

Se establecen como cargas capacitivas los elementos que se caracterizan por tener dos capas metálicas paralelas entre sí y un aislante que crean el fenómeno de capacitancia, como los cables aislados en media tensión, condensadores o tendidos en canalizaciones subterráneas, la propiedad más relevante es que la señal de corriente se encuentra adelantada respecto a la señal voltaje. Para este tipo de carga se tiene un factor de potencia en adelanto. Aquí la corriente está adelantada 90° con respecto al voltaje, por tal razón se establece un desfase positivo (+) como se observa en la figura 8 [9].

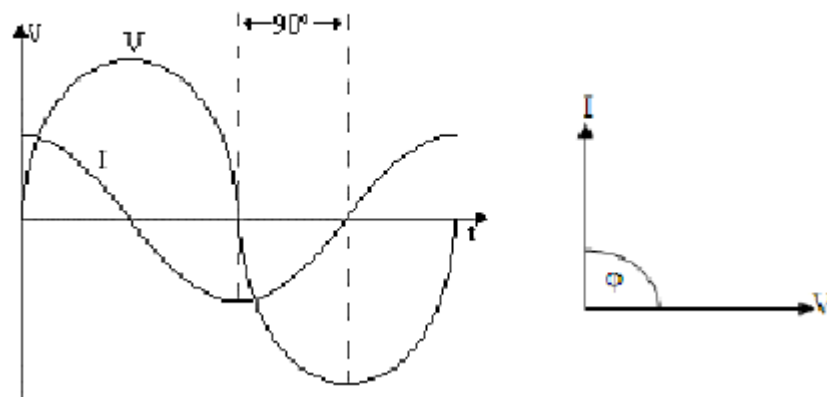


Figura 8. Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente en cargas capacitivas.
Fuente: tomado de [9].

4.2.5 TRANSFORMACIÓN DE CLARKE Y PARK

Este método convierte los vectores en un sistema estático ortogonal balanceado de 2 fases en un marco de referencia rotacional perpendicular. fundamentalmente, los 3 marcos de relación considerados en esta implementación son:

1. Sistema de referencia de tres fases, en el que I_a , I_b e I_c son proporciones trifásicas coplanarias en un ángulo de 120 grados entre sí.
2. Sistema de referencia estacionario ortogonal, en el que I_α (a lo largo del eje α) e I_β (a lo largo del eje β) son perpendiculares entre sí, pero en el mismo plano que el marco de referencia trifásico.
3. Método de referencia circulante ortogonal, en el que se forma un ángulo θ (ángulo de rotación) con respecto al eje α e I_q es perpendicular a I_d a lo largo del eje q . [29]

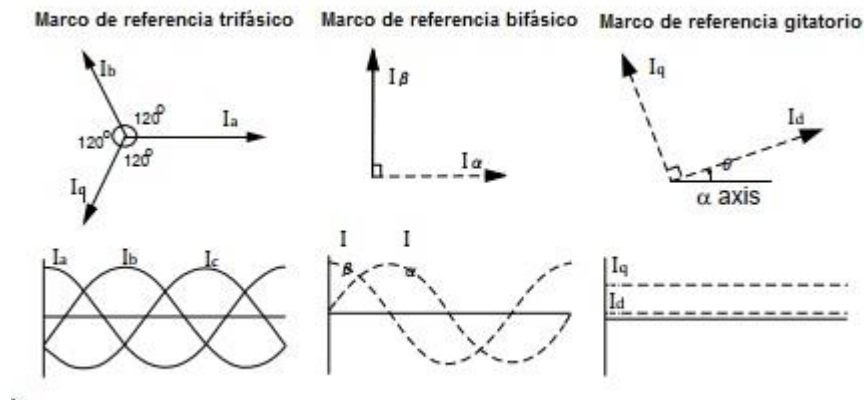


Figura 9. Marcos de referencia - Transformaciones Clarke y Park. Fuente: creación propia basada en aportes de [23].

5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN APLICACIONES RESIDENCIALES

5.1. PRINCIPIOS DE COMPENSACIÓN

En un circuito lineal, la potencia reactiva se define como el componente de corriente alterna (CA) de la potencia instantánea, con una frecuencia igual a 100/120 Hz en un sistema de 50 o 60 Hz. La potencia reactiva generada por la fuente de alimentación de CA se almacena en un condensador o un reactor durante un cuarto de ciclo, y en el siguiente cuarto de ciclo se envía de vuelta a la fuente de alimentación. En otras palabras, la potencia reactiva oscila entre la fuente de CA y el condensador o reactor, y también entre ellos, a una frecuencia igual a dos veces el valor nominal (50 o 60 Hz) [10].

Por este motivo se puede compensar mediante generadores de voltiamperios reactivos (VAR), evitando su circulación entre la carga (inductiva o capacitiva) y la fuente, y por tanto mejorando la estabilidad de tensión del sistema de potencia.

La compensación de potencia reactiva se puede implementar con generadores VAR conectados en paralelo o en serie [10].

Los sistemas de compensación en serie típicos usan condensadores para disminuir la reactancia equivalente de una línea de energía a la frecuencia nominal. La conexión de un capacitor en serie genera potencia reactiva que, de forma autorregulada, equilibra una fracción de la reactancia de transferencia de la línea [10].

El resultado es una funcionalidad mejorada del sistema de transmisión de energía a través de:

- 1) Mayor estabilidad angular del corredor eléctrico.
- 2) Estabilidad de voltaje mejorada del corredor.

- 3) Reparto de energía optimizado entre circuitos paralelos. Al igual que la compensación en derivación, la compensación en serie también se puede implementar con dispositivos de fuente de corriente o voltaje.

5.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

5.2.1 MODIFICADOR DE FASE SÍNCRONA O CONDENSADOR SÍNCRONO

El modificador de fase síncrona es un motor síncrono adquirido para accionar una carga, este elemento puede operar sobreexcitado para suministrar potencia reactiva (Q) a un sistema de potencia. A su vez también se utiliza para corregir el factor de potencia, se usa un motor síncrono operándose en vacío, ya que el sistema de potencia lo toma como un condensador grande. Hoy en día el uso de este tipo de motores para la compensación de reactivos no es tan usual, debido a que es más económico un capacitor estático convencional. No obstante, aún existen viejas plantas industriales que utilizan esta técnica [3].

5.2.2 CONDENSADORES EN DERIVACIÓN (SHUNT)

El condensador de derivación suministra potencia reactiva y aumenta los voltajes locales. Se utilizan en todo el sistema y se aplican en una amplia gama de tamaños. Los condensadores de derivación fueron utilizados por primera vez a mediados de la década de 1910 para corregir el factor de potencia. Debido a su gran tamaño y a los materiales dieléctricos más baratos, y otras mejoras en la construcción de los condensadores, traen consigo reducciones significativas en el precio y tamaño. Hoy en día, son un medio muy económico de suministrar energía reactiva. Las principales ventajas de los condensadores en derivación son su económico coste y su adaptabilidad de instalación y operación. El principal inconveniente de los condensadores en derivación es que su salida de potencia reactiva es ajustada al cuadrado del voltaje. En consecuencia, la salida de

potencia reactiva se reduce a tensiones bajas cuando es probable que más se necesite [11].

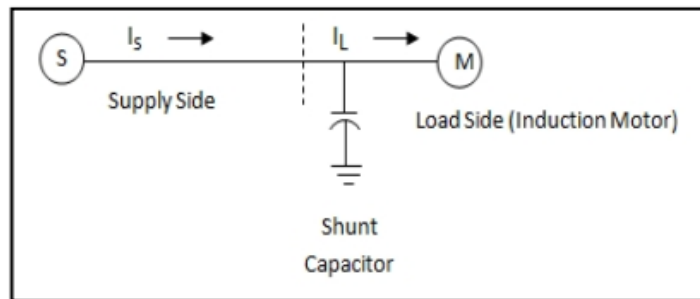


Figura 10. Configuración de capacitor en derivación. Fuente: tomado de [10].

5.2.3 CONDENSADORES EN SERIE (SERIES)

Este tipo de condensadores se conectan en serie con los conductores de línea para compensar la reactancia inductiva de la red. Esto reduce la reactancia de transferencia entre los buses a los que está conectada la línea, de igual manera aumenta la potencia máxima que se puede transmitir y reduce las pérdidas de potencia reactiva. Aunque los condensadores en serie no suelen instalarse para el control de voltaje como tales, colaborar a optimizar el control de voltaje y el equilibrio de la potencia reactiva. La potencia reactiva producida por un condensador en serie aumenta al aumentar la transferencia de potencia [11].

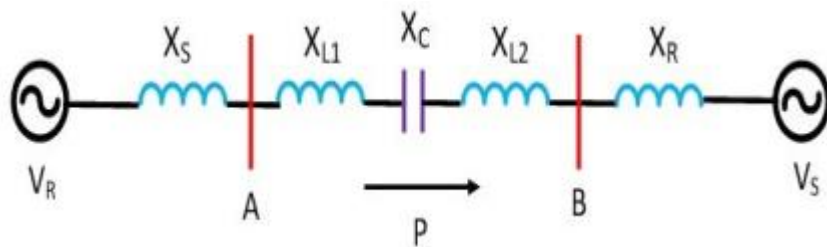


Figura 11. Configuración de capacitor en serie. Fuente: tomado de [10].

5.2.4 FILTRO DE ARMÓNICOS

Los filtros de armónicos están diseñados de diferentes formas y tamaños". En general, los filtros armónicos son filtros de derivación debido a que están conectados en paralelo con el sistema de energía y proporcionan caminos de baja impedancia a tierra para corrientes en una o más frecuencias armónicas [12]. Para aplicaciones de energía, los filtros de derivación son casi siempre más económicos que los filtros en serie por las siguientes razones:

1. Los componentes de la serie deben estar clasificados para la corriente completa, incluido el componente de frecuencia de potencia. Tal requisito conduce a tamaños de componentes más grandes y, por lo tanto, a mayores costos económicos.
2. Los componentes del filtro de derivación generalmente deben estar clasificados sólo para una parte del voltaje del sistema (generalmente con respecto a tierra). Estos requisitos dan lugar a componentes de menor tamaño.

Los filtros de derivación están diseñados (o se pueden comprar) en tres categorías básicas de la siguiente manera:

1. Filtros de un solo ajuste.
2. Filtros sintonizados múltiples (generalmente limitados a dobles).
3. Filtros amortiguadores (de primer, segundo o tercer orden, o "tipo c" más nuevos).

Los filtros de sintonización simple y doble se usan generalmente para filtrar frecuencias específicas, mientras que los filtros amortiguados se usan para filtrar una amplia gama de frecuencias. En aplicaciones que involucran cargas de producción de armónicos pequeños, a menudo es posible usar un filtro de

sintonización simple (generalmente sintonizado cerca del quinto armónico) para eliminar corrientes armónicas problemáticas. En aplicaciones grandes, como las asociadas con los hornos de arco, a menudo se utilizan filtros sintonizados múltiples y un filtro amortiguado [12]. A continuación, se evidencian los diferentes tipos de filtros armónicos.

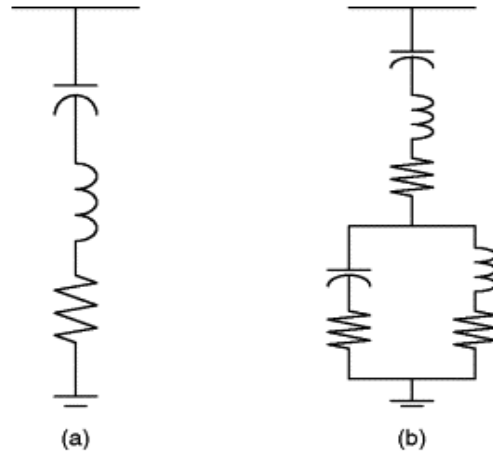


Figura 12. filtros de armónicos: (a) sintonizados simples y (b) sintonizados dobles. Fuente: tomado de [12].

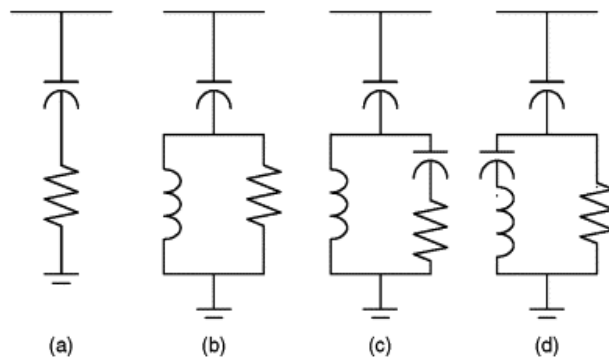


Figura 13. Filtros amortiguados: (a) de primer orden; (b) segundo orden; (c) tercer orden; y (d) tipo C. Fuente: tomado de [13].

5.2.5 GENERADOR SÍNCRONO

La máquina síncrona puede funcionar simultáneamente como un generador y un compensador. Al cambiar la corriente de campo, se modifica la potencia reactiva intercambiada con la del sistema. En los casos de generadores excitados eléctricamente, cuando la máquina está sobreexcitada genera energía reactiva en la red, cualquiera que sea la situación, las corrientes del estator no deben exceder el valor nominal y la corriente de campo no debe superar sus valores máximos admisibles. Para aplicaciones industriales duraderas, por razones de seguridad, se deben cumplir los requisitos térmicos. Los generadores síncronos se utilizan para sistemas de generación de energía eólica (redes locales) pero también para estaciones de generación de energía clásicas que entregan la energía a las redes nacionales. Para estos generadores, el sistema descrito es muy útil. Además, el costo de implementación es bajo debido a la simplicidad de los esquemas [13].

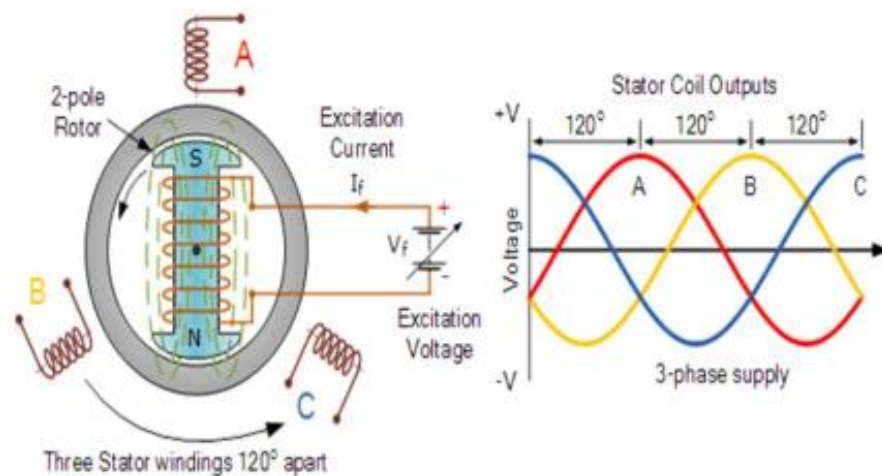


Figura 14. Condensador síncrono o generador síncrono. Fuente: tomado de [10].

5.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE CA FLEXIBLE - FACTS (Flexible AC Transmission System)

Un sistema de transmisión de corriente alterna flexible (FACTS) es un sistema compuesto por equipos estáticos utilizados para la transmisión de energía

eléctrica de CA. Está destinado a mejorar la capacidad de control y aumentar la capacidad de transferencia de energía de la red. Generalmente es un sistema basado en electrónica de potencia.

FACTS está definido por IEEE como "un sistema basado en electrónica de potencia y otros equipos estáticos que proporcionan control de uno o más parámetros del sistema de transmisión de CA para mejorar la capacidad de control y aumentar la capacidad de transferencia de potencia" [19].

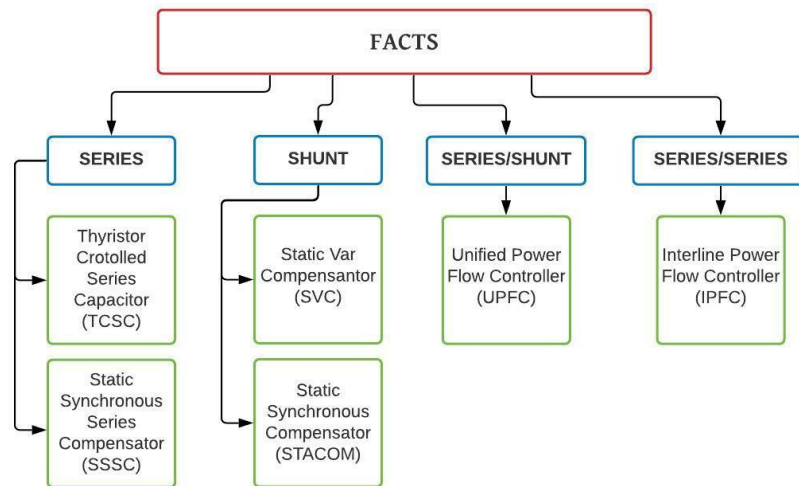


Figura 15. Tipos de FACTS. Fuente: Elaboración propia.

5.4 TIPOS DE COMPENSADORES

5.4.1 SVC

Según, el autor Camilo José Carrillo describe que: "El SVC o compensador de potencia reactiva estática se establece en el uso de tiristores, capacitores y bobinas, que generalmente son tecnologías para alimentar la electrónica de potencia. Cabe destacar que el uso de dispositivos electrónicos de potencia está

cada vez más esparcido, además de ser captado como una opción a la superación de las condiciones de transporte y la calidad del suministro eléctrico [10]. A diferencia de un compensador síncrono, una máquina que produce o absorbe energía reactiva a través de elementos de electrónica de potencia como semiconductores controlados conectados en paralelo con el sistema eléctrico no tiene partes móviles. Para equilibrar la potencia reactiva disponiendo de la amplitud de los voltajes en el bus de potencia fijo con el sistema, se ampliará el compensador estático VAR. Estas clases de máquinas pueden constar de bancos fijos o de capacitores de conmutación y bancos de reactores fijos o paralelos” [14][24].

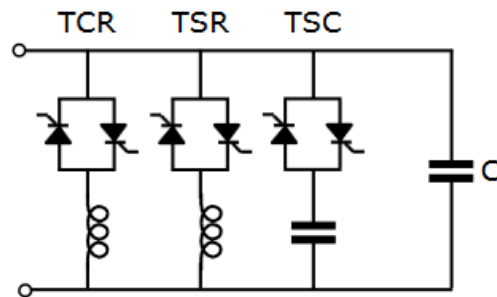


Figura 16. Esquema de un SVC. Fuente: tomado de [14].

5.4.1.1 CONDENSADOR CONMUTADO POR TIRISTORES

El esquema del condensador conmutado por tiristor o thyristor switched capacitor (TSC) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactivos. En la figura 17, se evidencia la configuración de un TSC que está formado por un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en antiparalelo en serie con un condensador o batería de condensador. De modo que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir en el momento que estén polarizados positivamente. En el caso de la

desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagan en el instante en el cual la corriente que los atraviesa cruce por cero [14].

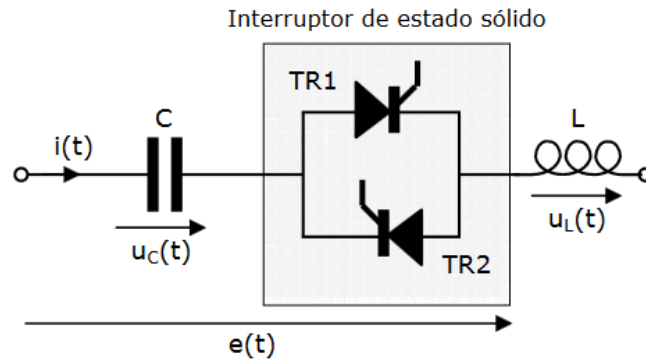


Figura 17. Configuración de un TSC. Fuente: tomado de [14].

5.4.1.2 BOBINA CONTROLADA POR TIRISTORES

Las bobinas controladas por tiristores o (TCR) es otro componente característico en los SVC, la principal misión de este componente es la de conseguir una regulación rápida y continua de la potencia reactiva absorbida por un inductor [14].

En la figura 18, se muestra el bosquejo de un TCR el cual está formado por una bobina (RL) y un convertidor CA/CA compuesto por 2 tiristores en antiparalelo. En esta circunstancia, a la electrónica de potencia se le establece un control de fase, de forma que se regula el valor efectivo de la corriente que circula a través de la reactancia [14].

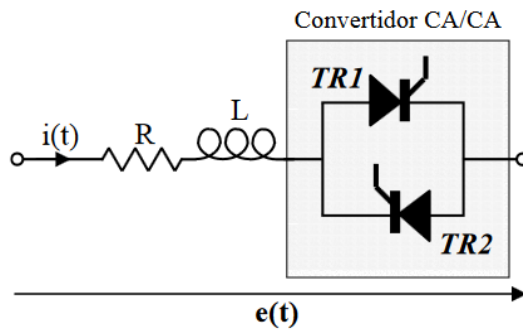


Figura 18. Configuración de un TCR. Fuente: tomado de [14].

5.4.2 STATCOM, COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO

Un STATCOM es un equipo acoplado a la red basado en una fuente convertidora de voltaje (voltage-source converter VSC). Su función es básicamente la misma que SVC con rangos de operación más amplios y respuestas más rápidas. Además, tiene la capacidad de actuar como un generador o una carga de potencia reactiva, permitiendo un interrumpido control de la carga en el sistema. El STATCOM está compuesto por elementos totalmente controlables. El uso de equipos como convertidores STATCOM se puede acoplar con bancos fijos de condensadores y reactancias combinando las ventajas de ambos, para aumentar la capacidad del sistema [15],[16].

Los voltage-source converter (VSC) tienen dos componentes principales, en primer lugar se encuentra la electrónica de potencia (semiconductores IGBT, GTO, entre otros) con una distribución de topología de tercer nivel para soluciones de en los campos de media tensión. Este elemento es un inversor de puente completo de auto conmutación voltaje de acuerdo con la teoría de la electrónica de potencia. El voltaje de CC del condensador actúa como una fuente de voltaje de CC ideal para soportar el inversor. El diodo regular conectado en la dirección opuesta y en paralelo con el GTO es una ruta para la corriente continua, que proporciona una ruta para la energía de retroalimentación desde el lado de

CA. El funcionamiento normal del inversor es transferir el voltaje de CC a voltaje de CA que tiene una magnitud controlable y un ángulo de fase a la misma frecuencia que el sistema de CA, en la figura 19 se muestra la configuración del STATCOM [15], [16].

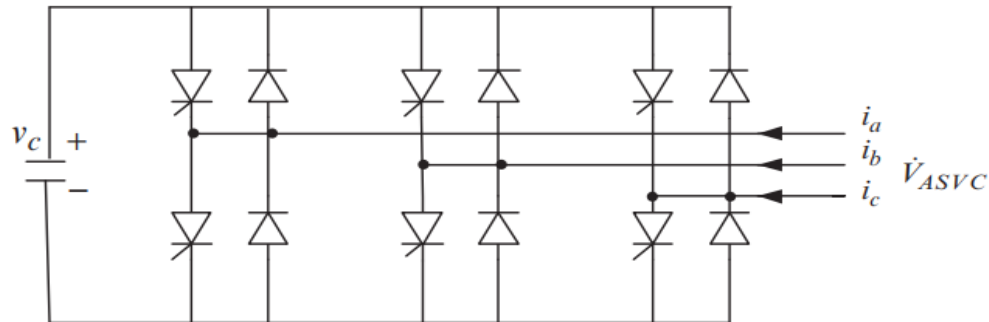


Figura 19. Configuración de un TCR. Fuente: tomado de [16].

5.4.3. D-STATCOM

D-STATCOM es el controlador más importante para las redes de distribución. Se ha utilizado ampliamente desde la década de 1990 para regular con precisión el voltaje del sistema, mejorar el perfil de voltaje, reducir los armónicos de voltaje, reducir las perturbaciones de voltaje transitorias y la compensación de carga. En lugar de utilizar condensadores e inductores convencionales combinados con interruptores rápidos, el D-STATCOM utiliza un convertidor de electrónica de potencia para sintetizar la salida de potencia reactiva. Un convertidor D-STATCOM se controla mediante modulación de ancho de pulso (PWM) u otras técnicas de modelado de voltaje / corriente [16]. Los D-STATCOM se utilizan con más frecuencia que los controladores STATCOM. En comparación con STATCOM, los D-STATCOM tienen una potencia nominal considerablemente más baja y, en consecuencia, interruptores de electrónica de potencia más rápidos, por lo que la frecuencia portadora PWM utilizada en un controlador de distribución puede ser mucho mayor que en un controlador FACTS (Flexible AC Transmission System) [17].

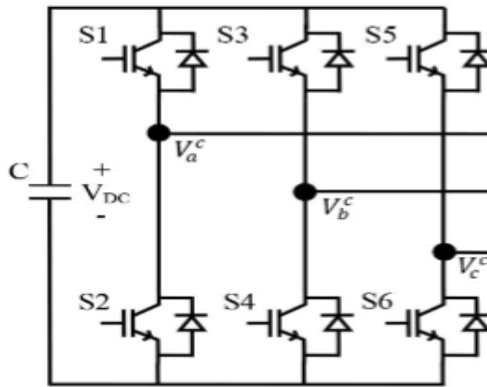


Figura 20. Configuración de un D-STATCOM. Fuente: tomado de [18].

6. TOPOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE COMPENSACIÓN.

Para determinar una topología para el compensador se establecieron ciertos criterios de evaluación, entre los cuales se comprenden los siguientes, bajo costo de implementación, control de armónicos, compensación de reactivos, control de entrada o salida reactivos al servicio a continuación se analizaron diferentes topologías que se basaron principalmente en la compensación de tipo D-STATCOM, estos prototipos que se muestran a continuación están diseñados para un sistema trifásico, El D-STATCOM se puede clasificar sobre la base de diferentes topologías, número de dispositivos de conmutación y sobre la base de la compensación de corriente neutra, etc.

Estos D-STATCOM se desarrollan para cumplir con los requisitos de diferentes aplicaciones en el sistema de distribución. En este documento se analiza la clasificación basada en topología.

6.1 CLASIFICACIÓN BASADA EN TOPOLOGÍA

Basado en las diversas topologías de VSI (voltaje Inversor de fuente) D-STATCOM se clasifica de la siguiente manera:

6.1.1 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO DE TRES HILOS

Los D-STATCOM trifásicos de tres hilos se utilizan para compensar la carga del consumidor ya que mejora la calidad de la energía en el sistema de distribución trifásico. La topología de puente completo trifásica se muestra en la figura 21. Para esta topología, la suma de la intensidad (I) a través de sus tres ramales debe ser cero. La compensación de la corriente de secuencia cero que podría seguir en la carga no será posible, ni podrá eliminar ninguna corriente CC que fluya hacia la fuente desde la carga. Esto resultará en una distorsión en la fuente actual [21].

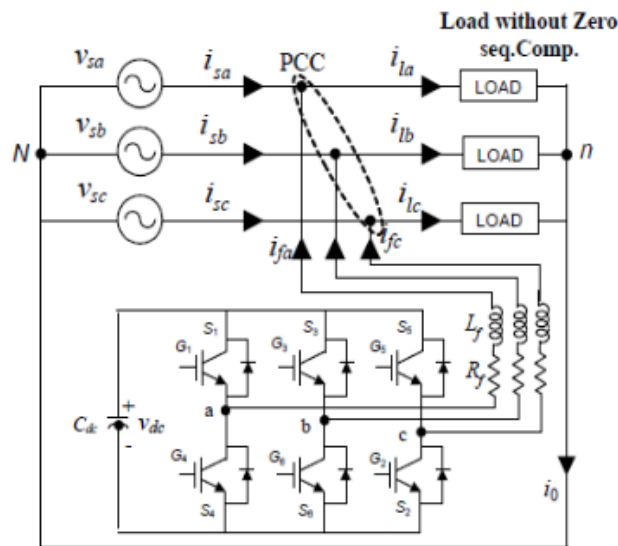


Figura 21. Topología de puente completo de tres fases. Fuente: tomado de [21].

6.1.2 TOPOLOGÍA VSI PUENTE-H

En la figura 22, se muestra la topología con puente-H estás establecen tres VSI de puentes H que están ensamblados a un condensador de acopio de CC común. En esta figura, cada switch representa un dispositivo semiconductor de potencia y una combinación de diodo antiparalelo. Cada VSI está conectado a la red a través de un transformador. 6 terminales de salida del transformador están conectadas en estrella. Estos seis terminales también se pueden ensamblar en triángulo para compensar una carga conectada en triángulo. En este caso, cada transformador se conecta en paralelo con la carga correspondiente. El propósito de incluir el

transformador es proporcionar aislamiento entre las patas del inversor, lo que evita que el condensador de almacenamiento de CC se cortocircuite a través de interruptores en diferentes inversores. El inductor L_f representa la inductancia de fuga de cada transformador y la inductancia externa adicional. La pérdida de cobre del transformador de conexión está representada por una resistencia R_f , pero debido a la presencia de transformadores de aislamiento, esta topología, sin embargo, no es adecuada para la compensación de las corrientes de carga que contienen componentes de CC [21].

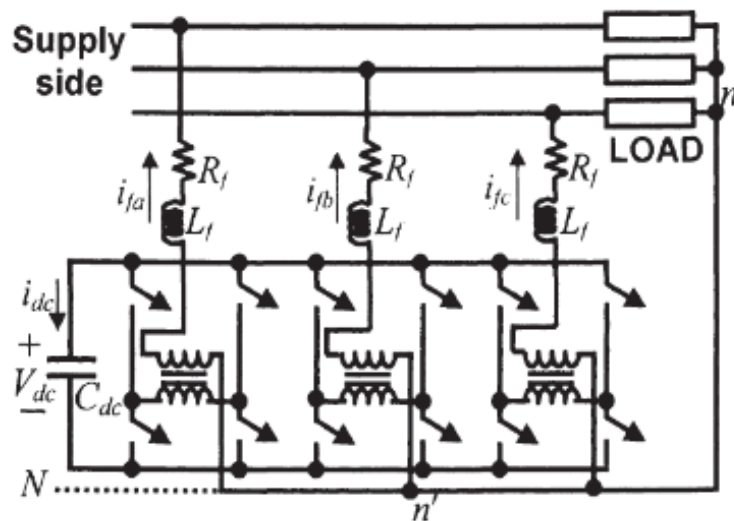


Figura 22. Topología de puente-H con condensador de alimentación CC común.
Fuente: tomado de [21].

6.1.3 TOPOLOGÍA TRIFÁSICA DE CUATRO HILOS CONECTADA EN ESTRELLA

El compensador utiliza una fuente de corriente, que consta de un inversor de fuente de voltaje (VSI) con seis interruptores (S1-S6) como se muestra en la figura 23 [21].

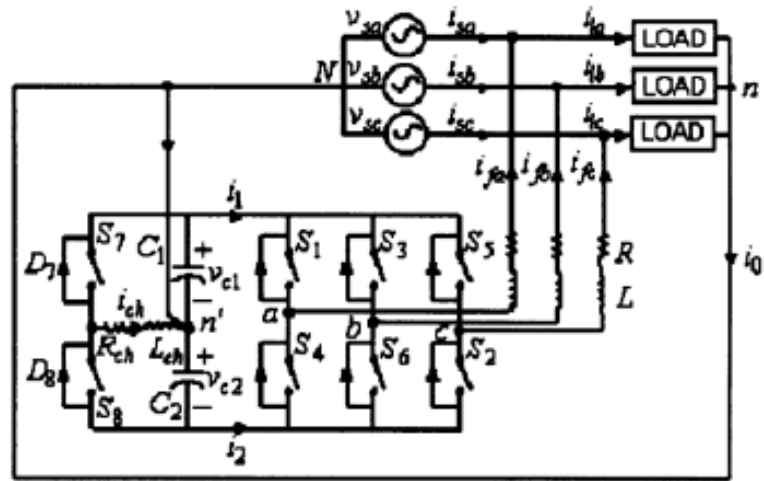


Figura 23. Topología trifásica de cuatro hilos conectado en estrella sistema de distribución. Fuente: tomado de [21].

6.1.4 TOPOLOGÍA VSI TRIFÁSICA CON ENCLAVAMIENTO DE NEUTRO

En la figura 24, se evidencia que la topología consta de un circuito chopper que está representado por los interruptores Sch1 y Sch2, un diodo Dch1 y Dch2 en paralelo e inductancia y resistencia que se indican con L_p y R_p . El propósito de este circuito chopper es equilibrar los voltajes en los dos condensadores. Deje que el voltaje en Cdc1 sea V_{dc1} y el voltaje en Cdc2 sea V_{dc2} . Normalmente, los dos interruptores se dejan abiertos y, por lo tanto, dos voltajes V_{dc1} y V_{dc2} son iguales. Ahora suponga que hay una caída de voltaje en V_{dc1} debido a que hay un aumento de voltaje en V_{dc2} . La corriente se acumula en el inductor L_p debido al cierre del interruptor Sch2 y una vez que la corriente alcanza un nivel definido, el interruptor Sch2 se abre, por lo tanto, la corriente del inductor se descarga a través del diodo Dch1 para elevar el voltaje V_{dc1} al nivel deseado [21].

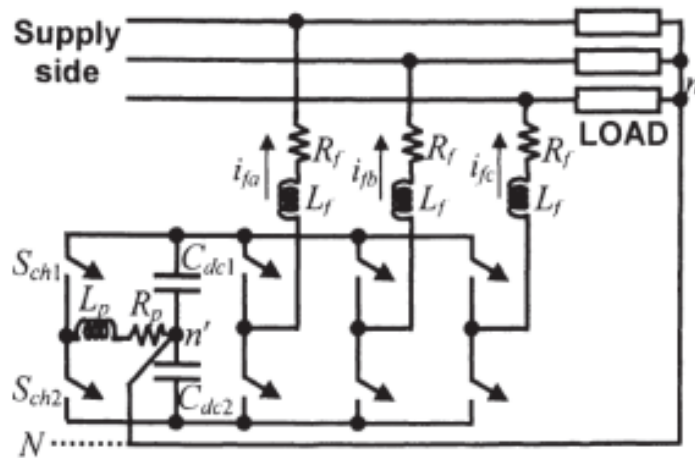


Figura 24. Topología VSI trifásica con sujeción neutra. Fuente: tomado de [21].

6.1.5 TOPOLOGÍA VSI TRIFÁSICA DE CUATRO RAMAS

La figura 25, muestra un VSI con cuatro patas que se utilizan y requiere solo una unidad de almacenamiento de CC. Tres de sus patas se utilizan para la conexión de fase, mientras que la cuarta pata está conectada al neutro de carga y al neutro de alimentación, si está disponible, a través de una reactancia [6-8]. La corriente de referencia para el cuarto tramo es la suma negativa de las corrientes de carga trifásicas. Esto anula el efecto del componente de CC de la corriente de carga. Para mantener la carga adecuada en el condensador del lado de CC, se utiliza un regulador PI para controlar el flujo de energía real desde el lado de CA hacia el lado de CC del convertidor [21].

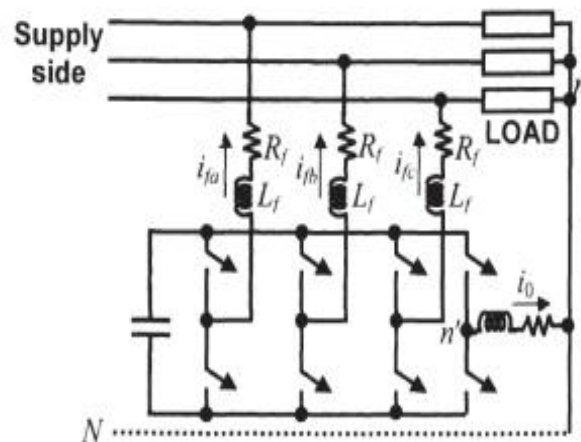


Figura 25. Configuración de topología que utiliza un VSI de cuatro patas. Fuente: tomado de [21].

6.1.6 TOPOLOGÍA VSC AISLADO DE DOS RAMAS

El VSC de dos patas tiene un condensador dividido con un transformador en el D-STATCOM trifásico de cuatro hilos. El transformador proporciona aislamiento del sistema. En la figura 26, se muestran topologías D-STATCOM de cuatro hilos, trifásicas y de dos ramales que utilizan estrella-triángulo y conexión en T; trifásico de tres hilos con dos devanados de fase conectados a las dos patas de VSC y el devanado de tercera fase conectado al punto medio del condensador dividido en el devanado lateral VSC del transformador. Las tres fases de los bobinados laterales del sistema están conectadas a las tres fases del suministro y el neutro del devanado está conectado con el neutro del sistema de suministro trifásico de 4 cables. El filtro de ondulación se conecta por separado al sistema de suministro [21].

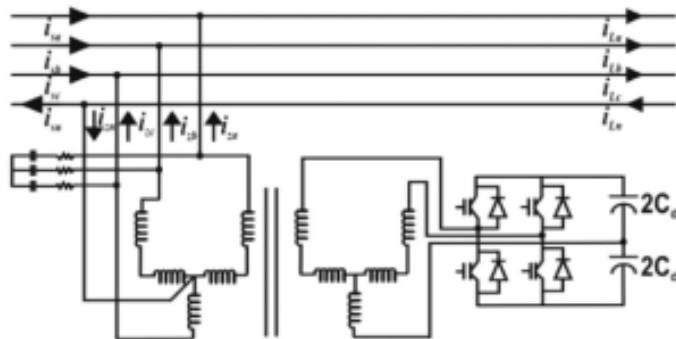


Figura 26. Topología D-STATCOM trifásica de 4 hilos aislada de dos ramales basada en VSC. Fuente: tomado de [21].

6.1.7 TOPOLOGÍA SIN VSC AISLADO SIN TRANSFORMADOR

Las topologías D-STATCOM basadas en VSC no aisladas que no utilizan transformador se clasifican como topología basada en VSC de cuatro y tres ramas. La topología se muestra en la figura 27, en donde se presenta una implementación de un VSC de cuatro patas que utiliza un algoritmo de control

basado en una red neuronal adaptativa para la compensación de cargas lineales / no lineales [21].

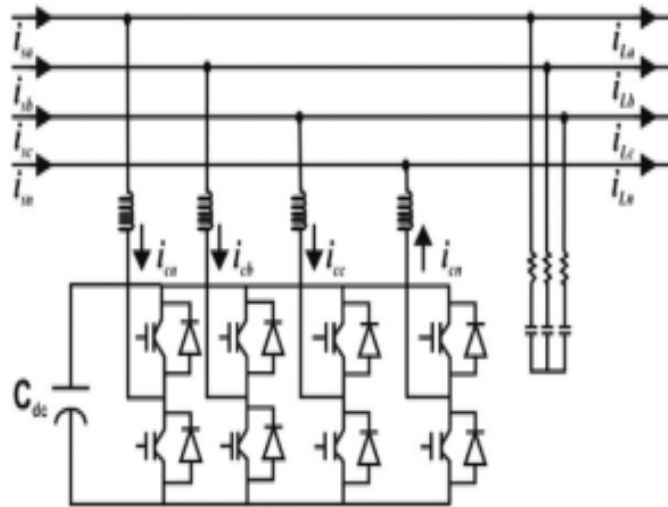


*Figura 27. Topología D-STATCOM trifásico de 4 hilos basado en VSC no aislado.
Fuente: tomado de [21].*

7. MODELADO DEL SISTEMA EN UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Debido a que, el objetivo principal de este trabajo es la compensación de reactivos para aplicaciones residenciales de bajo costo, se presenta a continuación la configuración del sistema donde se describe detalladamente cada uno de los bloques. Para la realización de dicho modelo se usó el software MATLAB Simulink, esta herramienta usa un lenguaje de programación gráfica que ofrece modelado, simulación y análisis de sistemas dinámicos gracias a su entorno de interfaz gráfica de usuario (GUI). Además de ello, Simulink tiene una estrecha integración con el entorno MATLAB en la cual tiene bibliotecas de bloques y cajas de herramientas integrales para la realización de análisis lineales y no lineales.

7.1 SISTEMA MONOFÁSICO

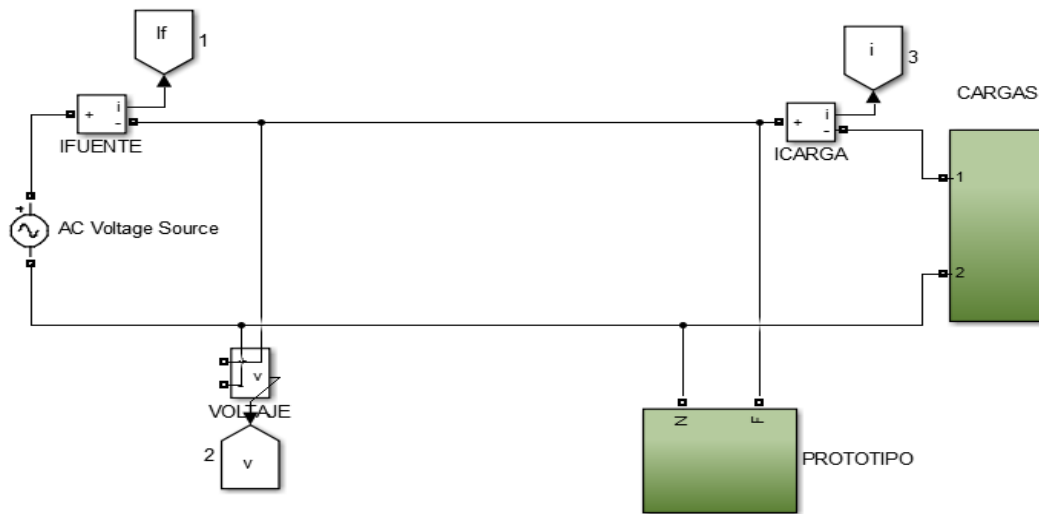


Figura 28. Topología sistema monofásico (F-N). Fuente: Elaboración propia.

7.2 SISTEMA TRIFÁSICO VIRTUAL

Seguidamente, se modeló un sistema trifásico virtual ya que el prototipo que se pretende diseñar está basado en transformaciones matemáticas que se utilizan a menudo para desacoplar variables y resolver ecuaciones que involucran cantidades variables en el tiempo al referir todas las variables a un marco de referencia común. Las transformaciones matemáticas que se usaron fueron: transformación de Clarke y Park que se describen más adelante, inicialmente para realizar dicho procedimiento matemático se necesitó de realizar la sincronía con la red como se muestra a continuación. El sistema se creó a partir del bloque PLL que se describe más adelante, el procedimiento para obtener las fases b y c se realizó con dos bloques de la librería. [28] El primero describe la función en la cual se introduce matemáticamente el desfase que se requiere, en este caso el desfase realizado fue de 120° eléctricos. De igual manera, el segundo bloque aplica un retardo a la primera señal de entrada. Se toma la señal de voltaje y la función nombrada anteriormente, para realizar el desfase el bloque implementa la función $y = u(t - T_o(t))$. El sistema trifásico virtual se observa en la figura 29.

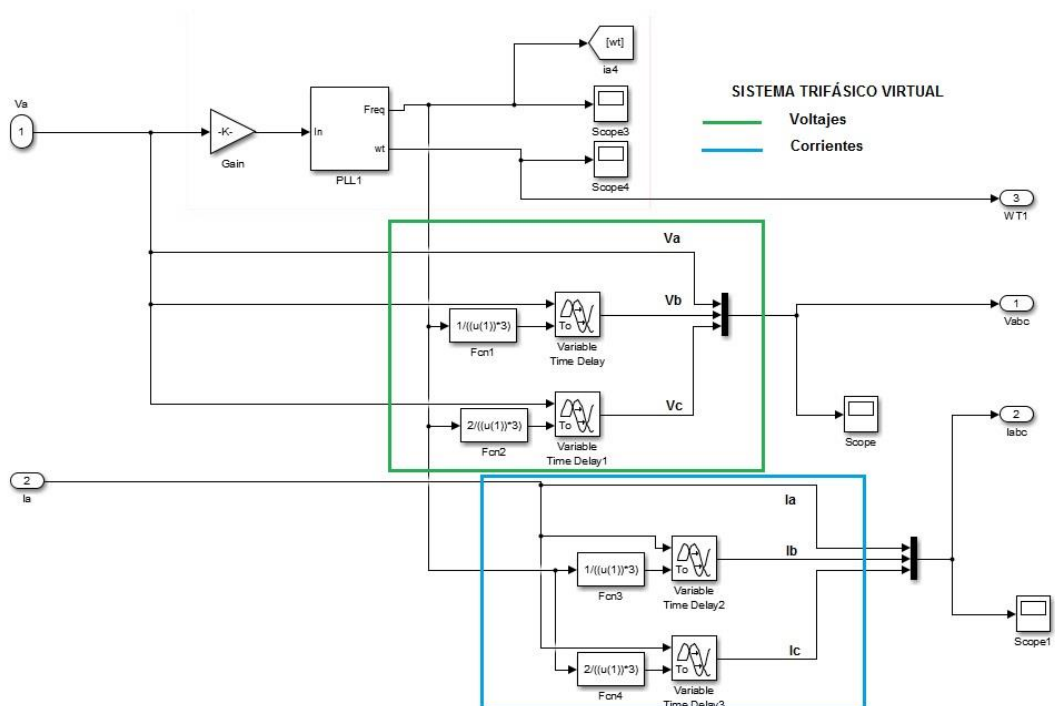


Figura 29. Sistema trifásico virtual (FFF). Fuente: Elaboración propia.

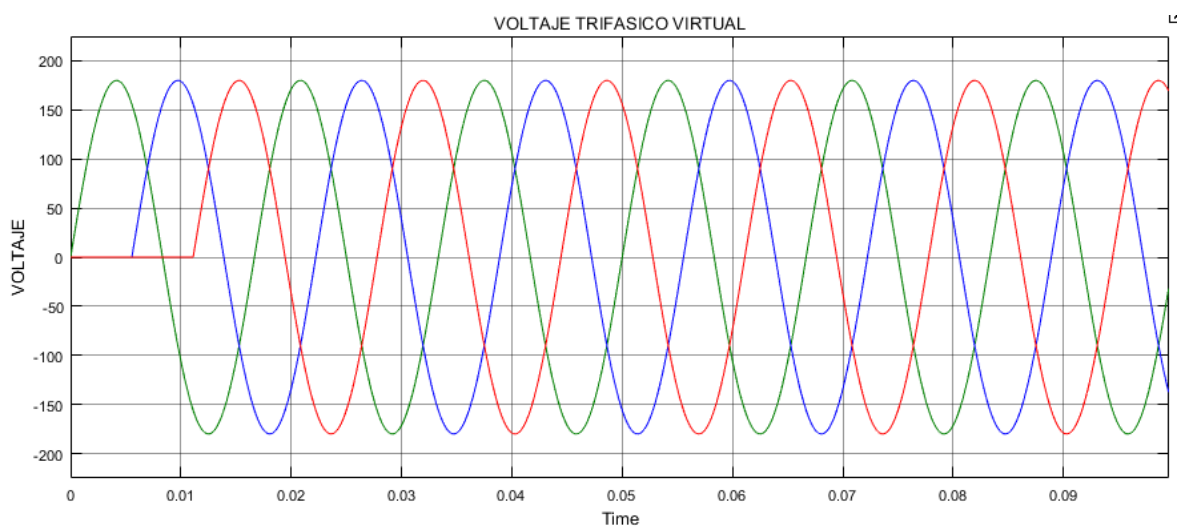


Figura 30. Señales de voltaje trifásico virtual. Fuente: Elaboración propia.

7.2.1 SINCRONÍA CON LA RED

En la primera etapa de control se realizó la sincronía con la red eléctrica esto debido a las variaciones que se presentan en la red. Para ello se utilizó el algoritmo de seguimiento de fase comúnmente llamado PLL. El funcionamiento de este bloque utilizado tomado de la librería Matlab es la obtención de la frecuencia, así como también de la velocidad angular del sistema [21].

En la figura 31, se evidencia el bloque PLL el cual establece un modelo del sistema de control de fase donde se rastrea la fase y la frecuencia de la señal monofásica sinusoidal este proceso se realiza a partir de un oscilador de frecuencia interno [21].

Este procedimiento se realizó para lograr el desfase y obtener el sistema virtual, debido a que los valores de salida del PLL como la velocidad angular se usó más adelante. También se indica en la figura un bloque ganancia que tiene como finalidad pasar los valores de la red nominales a valores en p.u.

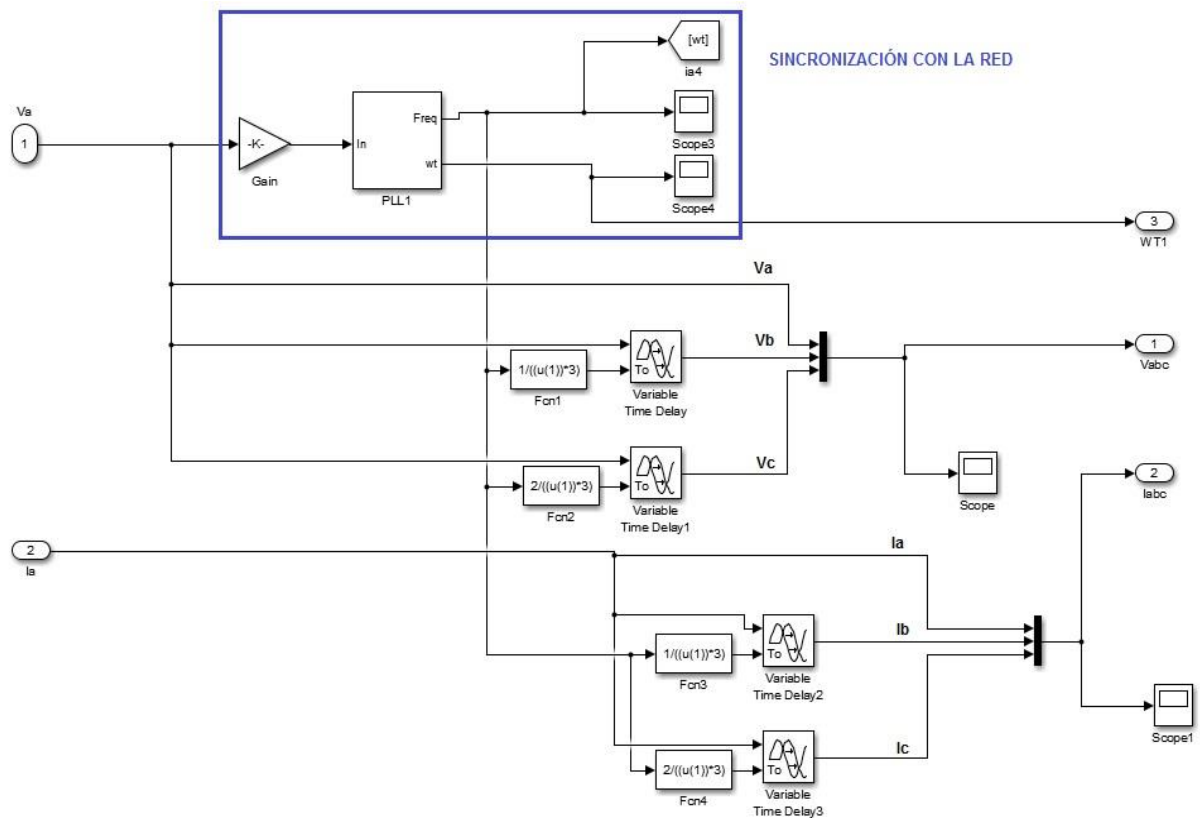


Figura 31. Bloque seguimiento de fase PLL Simulink. Fuente: Elaboración propia.

7.3 TRANSFORMACIÓN DE CLARKE Y PARK

7.3.1 CLARKE

Esta transformación convierte cantidades trifásicas balanceadas en cantidades en cuadratura bifásicas balanceadas. En la figura 32, se muestra el código en Matlab donde se modelaron las ecuaciones para pasar de referencias de voltajes y corrientes trifásicas a marco de referencia ortogonales.[23]

En la figura 33, se evidencia el bloque en simulink donde se observan las salidas Ialfa e Ibeta.

```

function [v_alpha,v_beta,il_alpha,il_beta]=fcn(va,vb,vc,ial,ibl,icl)
%#codegen
v_alpha=(va-vb/2-vc/2)*(2/3);
v_beta=(0+vb*sqrt(3)/2-vc*sqrt(3)/2)*(2/3);
il_alpha=(ial-ibl/2-icl/2)*(2/3);
il_beta=(ibl*sqrt(3)/2-icl*sqrt(3)/2)*(2/3);

```

Figura 32. Código en Matlab transformada de Clarke. Fuente: Elaboración propia.

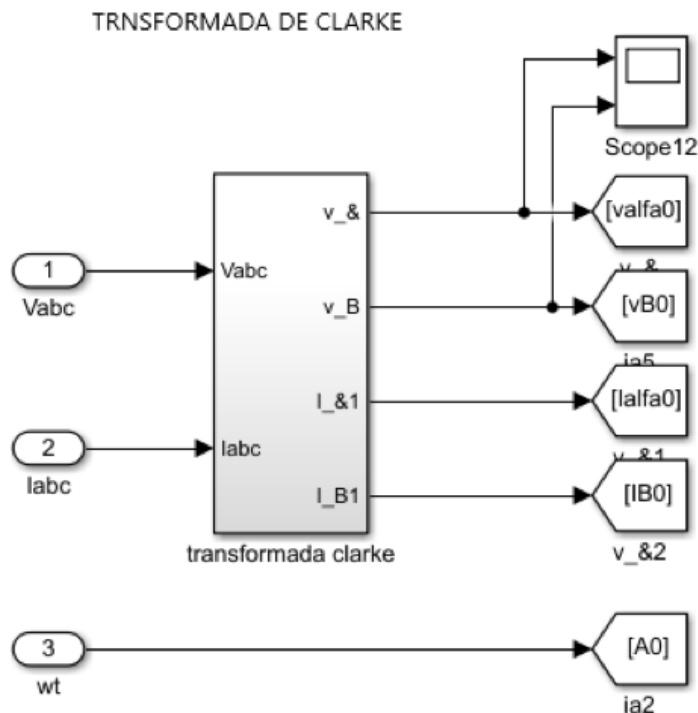


Figura 33. Bloque en Simulink transformada de Clarke. Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 PARK

La transformación de Park convierte los valores de marcos de referencia estacionarios ortogonales de dos ejes a cantidades de marcos de referencia giratorios. En la figura 34, se muestra el código en Matlab donde se modelaron las ecuaciones para pasar de referencias de voltajes y corrientes alfa y beta a marco de referencia ortogonales d y q. En la figura 35 y 36, se evidencia el bloque en simulink donde se observan las salidas antes mencionadas.

```

function [di,qi]=fcn(il_alpha,il_beta,wti)
%#codegen
di=il_alpha*cos(wti)+il_beta*sin(wti);
qi=-il_alpha*sin(wti)+il_beta*cos(wti);

```

Figura 34. Código en Matlab transformada de Park. Fuente: Elaboración propia.

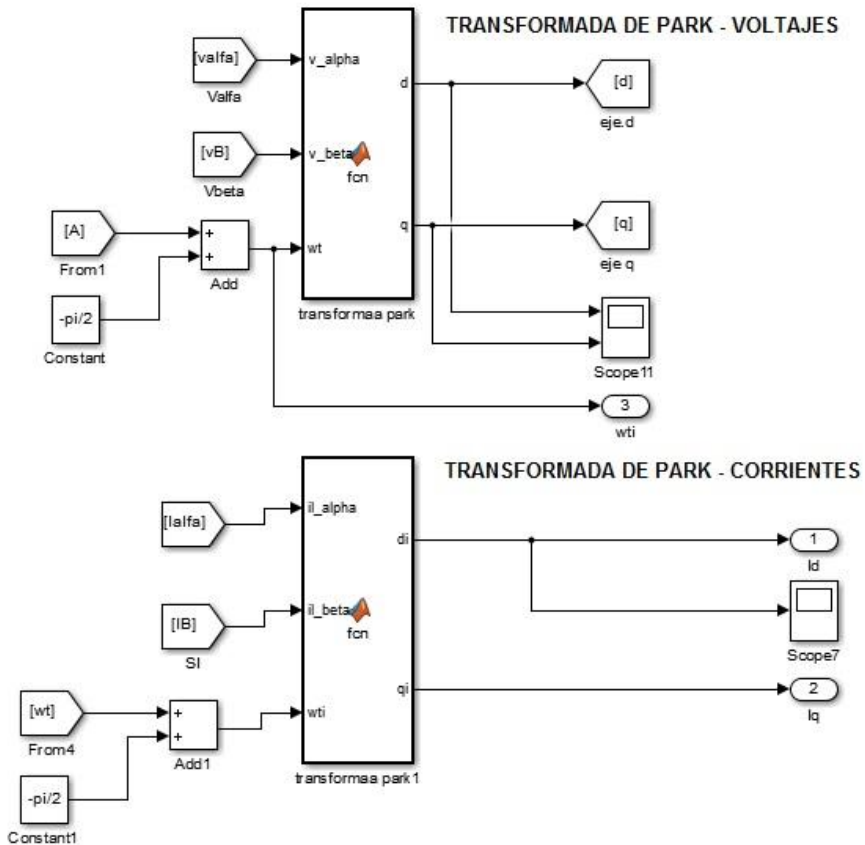


Figura 35. Bloque en Simulink transformada de Park para voltajes y corrientes. Fuente: Elaboración propia.

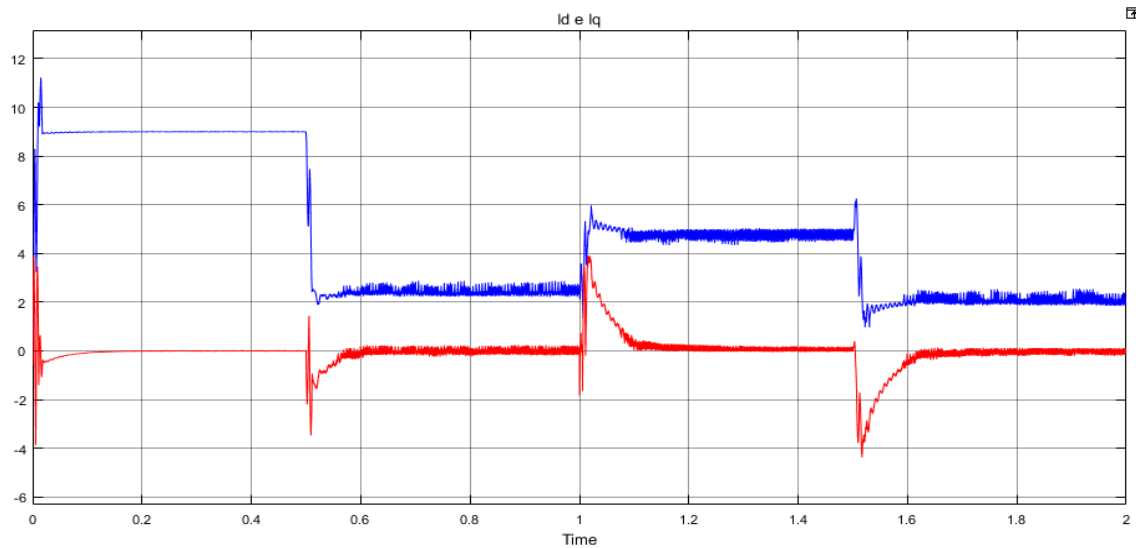


Figura 36. Salidas de la componente I_q e I_d mediante las transformadas de Park y Clarke. Fuente: Elaboración propia.

7.4 INVERSA DE CLARKE Y PARK

En la figura 37 se muestra el código en Matlab que modela las mediciones en ecuaciones para la transformación del sistema trifásico ya compensando, traduciendo en proceso inverso la corriente de compensación que se necesita para la aplicación de pulso pwm.

```
%TRANSFORMADA INVERSA DE PARK
function [ialpha, ibeta]= fcn(id, iq,wt)
%#codegen
ialpha=id*cos(wt)-iq*sin(wt);
ibeta=iq*cos(wt)+id*sin(wt);
```

Figura 37. Código en Matlab transformada inversa de Park. Fuente: Elaboración propia.

```
%TRANSFORMADA INVERSA DE CLARKE
function [ia,ib,ic]=fcn(ialpha, ibeta)
%#codegen
ia=ialpha*(2/3);
ib=(-1/2*ialpha+sqrt(3)*ibeta/2)*(2/3);
ic=(-1/2*ialpha-sqrt(3)*ibeta/2)*(2/3);
```

Figura 38. Código en Matlab transformada inversa de Clarke Fuente: Elaboración propia.

En la figura 39 se muestra el bloque que contiene y realiza el modelado de la corriente de compensación propia para la energía reactiva de las cargas, como el sistema no requiere de manejo de potencia activa que depende del control de la corriente en el eje D (I_q) esta se desprecia llevándola a 0 con la adición de la constante, dejando que la potencia activa que requiere el prototipo para funcionar la asuma la red.

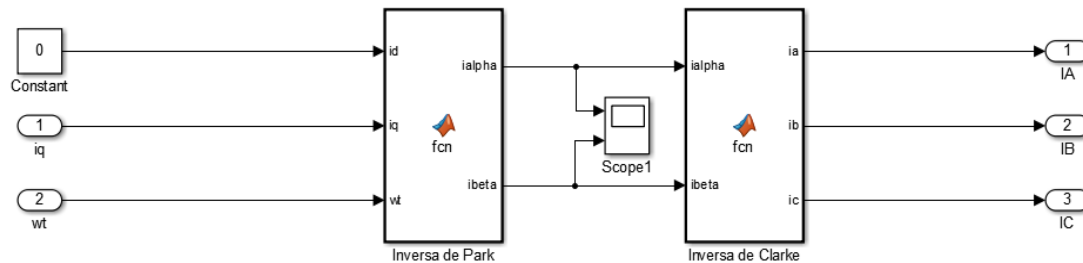


Figura 39. Bloque en Simulink transformada inversa de Park y Clarke para voltajes y corrientes. Fuente: Elaboración propia.

7.5 GENERADOR DE PULSOS PWM DE DOS NIVELES

A través de la librería Simulink se usó el generador de pulsos de 2 niveles controlado por PWM que está basado en ondas moduladoras y portadoras. Este bloque permite controlar dispositivos de conmutación de medio puente monofásico, puente completo monofásico, estás dos con modulación unipolar o bipolar, y de igual manera conmutación de puente trifásico. En la figura 40, se muestra el bloque el cual tiene dos entradas, la primera es la referencia que se toma a partir de la realización de la inversa de Clarke tomando la fase A. La segunda entrada corresponde a la señal rampa, o el ángulo eléctrico recorrido wt , es decir, la fase y la amplitud.

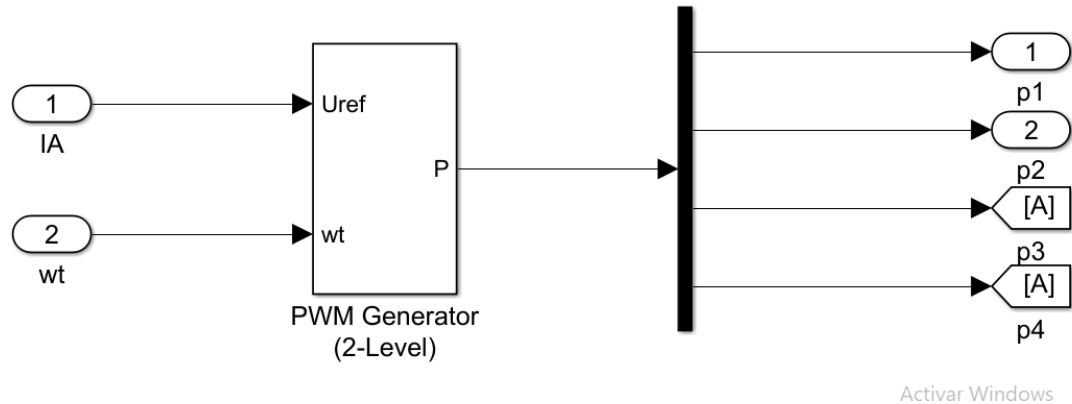


Figura 40. Bloque generador de pulso PWM de la librería Simulink. Fuente: Elaboración propia.

7.6 SISTEMA DE CONTROL LAZO CERRADO

El control de lazo cerrado tiene como fin que el sistema tenga un comportamiento definido, es decir, a partir de los valores calculados por las transformaciones de Clarke y Park el valor de i_q debe tender a cero, por lo tanto, el control mantiene el valor de cero de dicha corriente con base en la diferencia entre el bloque setpoint (constante) y la corriente medida i_q . La configuración del control PID se realizó de acuerdo con la función Tune que está definida por la librería Simulink. El bloque se muestra en la figura 41.

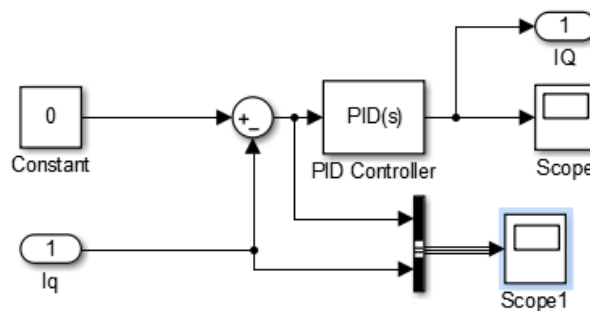


Figura 41. Bloque controlador PID. Fuente: Elaboración propia.

7.7 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO MONOFÁSICA

Anteriormente, se mencionaron los diferentes tipos de topologías D-STATCOM que se ajustan a sistemas trifásicos y cada una de ellas tiene diferente relevancia ante los múltiples fenómenos eléctricos que se deben disminuir [21]. La topología que más se ajusta es la de topología de puente completo de tres fases, ya que esta es utilizada eficazmente para corrección del factor de potencia de sistemas eléctricos, regular el voltaje y balanceo de cargas. Este trabajo se enfoca en las redes residenciales monofásicas por lo cual la topología escogida se ajustará para un solo hilo [21].

En la figura 42, se indica la topología de puente completo monofásica este bloque está conformado por un puente H mediante electrónica de potencia construido a partir de IGBT con diodo antiparalelo. El capacitor que se muestra tiene como finalidad proveer las intensidades reactivas que se inyectarán a la red para la compensación del factor de potencia [21]. De igual modo, en la figura 41 se indica el filtro RL que está conectado en línea con el inversor que tiene como finalidad minimizar la distorsión armónica en la intensidad inyectada al sistema [25].

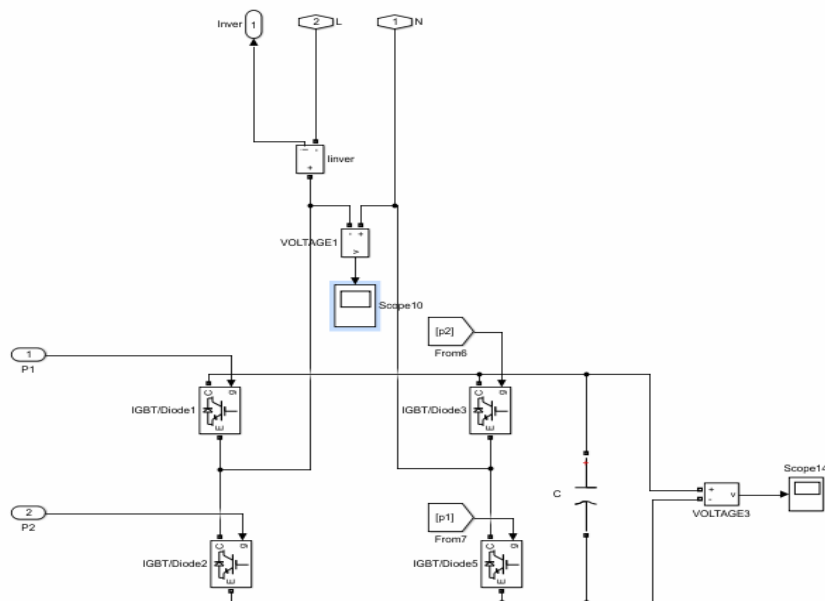


Figura 42. Bloque en Simulink topología de puente completo monofásica. Fuente: Elaboración propia.

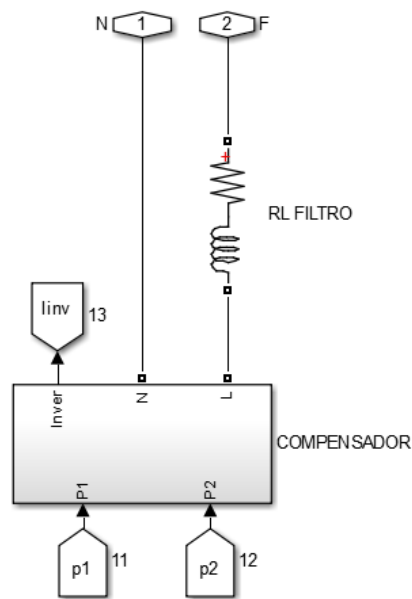


Figura 43. Bloque en Simulink topología de puente completo monofásica con filtro RL. Fuente: Elaboración propia.

8. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CARGA

En esta sección del libro se hace referencia a la simulación del prototipo completo una vez observado en el capítulo anterior la etapa de modelado donde se plantearon cada una de las partes que conforman el sistema. De igual manera, en este capítulo se plantean los diferentes escenarios de carga que se somete el prototipo con el objetivo de corroborar el funcionamiento del mismo.

8.1 ESQUEMA SIMULACIÓN

En base de lo dicho anteriormente en la figura 44 se presenta el esquema completo del modelo. Se puede observar cada uno de los bloques que constituye

el prototipo: sistema monofásico el cual es objetivo de este trabajo, sistema trifásico virtual, sistema de control, generador de pulsos (PWM), y a su vez el inversor, el cual se encarga de la compensación de reactivos y en conjunto con el filtro RL indirectamente reduce armónicos. Por último, se encuentra el bloque de carga [26].

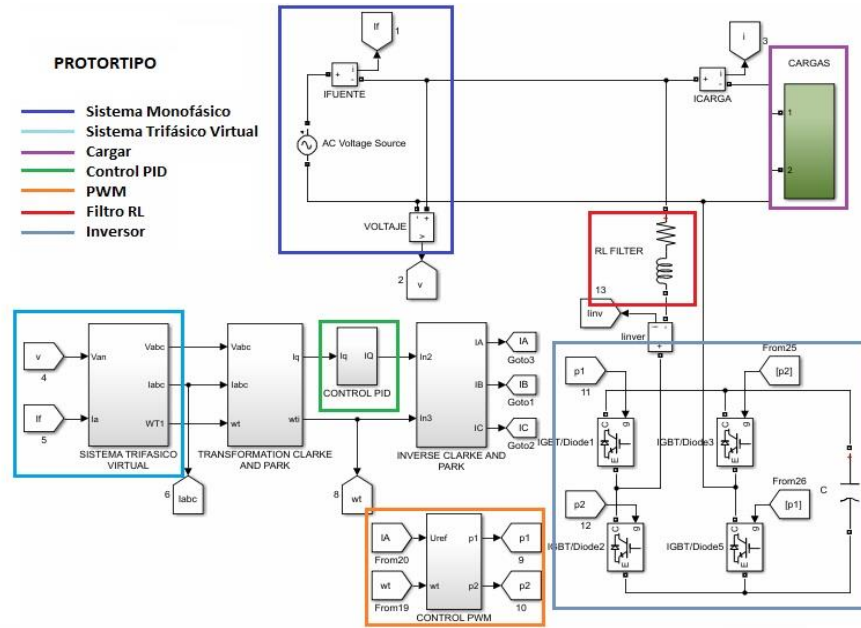


Figura 44. Esquema de simulación del prototipo completo en Matlab Simulink.
Fuente: Elaboración propia.

8.2 ESCENARIOS DE CARGA

Los escenarios de carga que fueron elegidos son cuatros y van de acuerdo a los modos de operación de un D-STATCOM: modo resistivo, modo inductivo y modo capacitivo. En la tabla 1, se observa las diferentes cargas con sus valores específicos. El sistema realiza la simulación en un intervalo de tiempo de 2 segundos que se dividirán en 4 periodos de 0.5 segundos, para ello se usó interruptores que permiten la entrada y salida de cada una de las cargas para observar el comportamiento de la carga sin conexión del compensador, apreciando voltaje y corriente que sería lo típico en los procesos de medición ante

escenarios de carga residenciales especialmente monofásicas. En la figura 45, se evidencia el bloque con los respectivos escenarios de carga nombrados anteriormente.

CARGAS	Resistencia (Ω)	Inductancia (H)	Capacitancia (μF)
Carga 1: R	25	NA	NA
Carga 2: RL	25	0,3	NA
Carga 2: RC	37	NA	106,7
Carga 3: L	NA	0,3	NA

Tabla 1. Valores respectivos de cada carga.

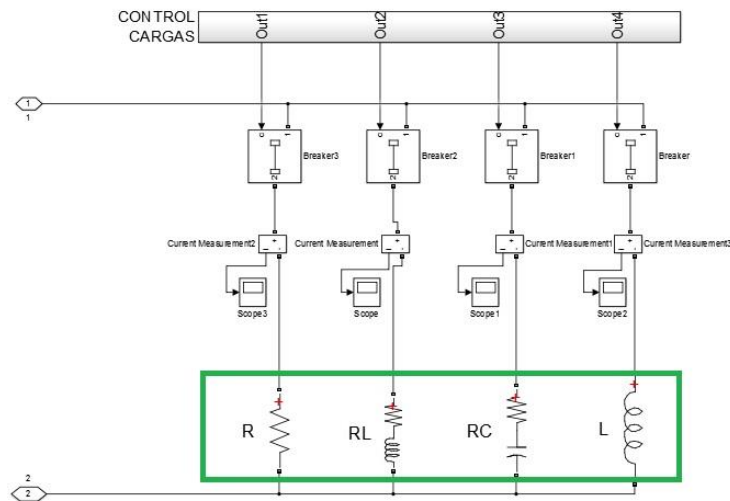


Figura 45. Bloque escenarios de carga. Fuente: Elaboración propia.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CARGAS.

En esta sección del libro se presentan los análisis de resultados en base de la simulación completa con las cargas conectadas al sistema. Los resultados se expresan a partir de gráficas donde se analizaron las siguientes variables: potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, perfil de tensiones, perfil de

corrientes, para ello se tienen dos casos. El primer caso corresponde al sistema monofásico sin el prototipo, el segundo caso corresponde al prototipo conectado a la red. Estos dos escenarios se plantean con el fin de observar el rendimiento dado por el sistema diseñado.

9.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA MONOFÁSICO SIN PROTOTIPO

9.1.1 POTENCIA ACTIVA DE LA CARGA

En la gráfica 46, se evidencia en un principio la potencia activa durante los cuatro escenarios de carga esto se refleja en el cambio que hace durante los tiempos preestablecidos de conmutación por parte de los interruptores donde se observan pequeños transitorios. Cada una de las cargas están consumiendo un valor de potencia activa esto debido a la naturaleza de la carga.

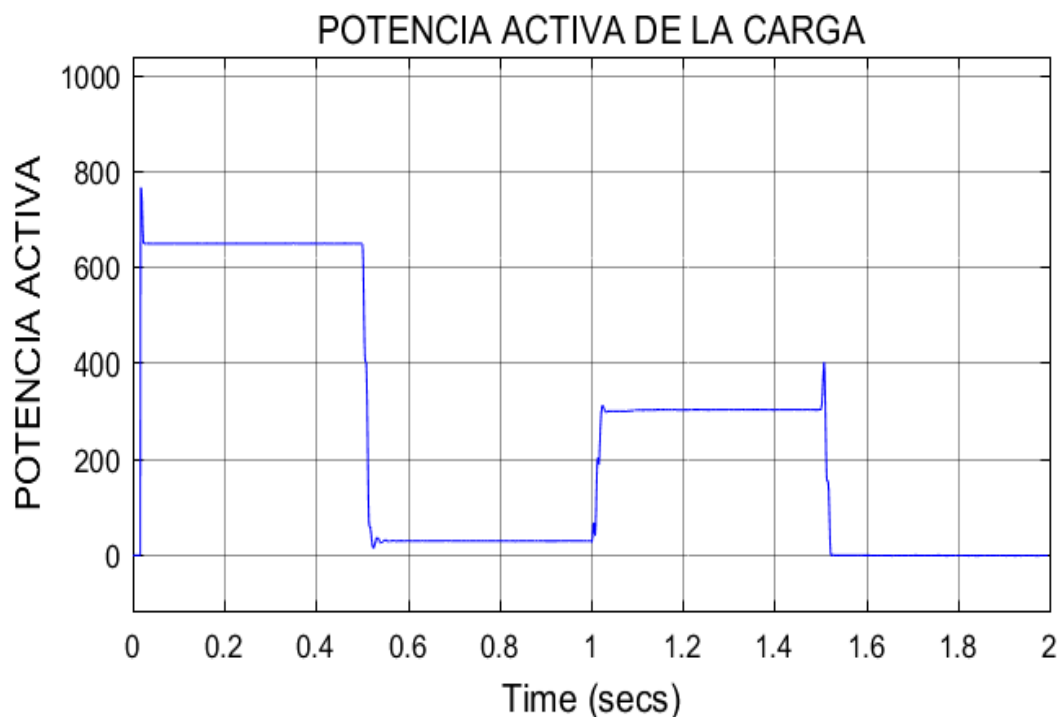


Figura 46. Potencia activa de la carga. Fuente: Elaboración propia.

9.1.2 POTENCIA REACTIVA DE LA CARGA

En la figura 47, se muestra en un principio la potencia reactiva durante los cuatro escenarios de carga esto se refleja en el cambio que hace durante los tiempos preestablecidos de conmutación por parte de los interruptores donde se observan pequeños transitorios. Cada una de las cargas están consumiendo un valor de potencia reactiva esto debido a la naturaleza de la carga. Así mismo, como el propósito del trabajo se enfocó en la compensación de reactivos se aprecia que: en el primer ciclo de 0.5 segundos donde se conectó una carga netamente resistiva no se está requiriendo energía reactiva. Por otro lado, en los ciclos siguientes sí se observa una variación de la potencia reactiva en el cual la potencia tomó valores positivos indicando consumo de reactivos, de igual manera tomó valores negativos lo cual indica que se están inyectando reactivos a la red.

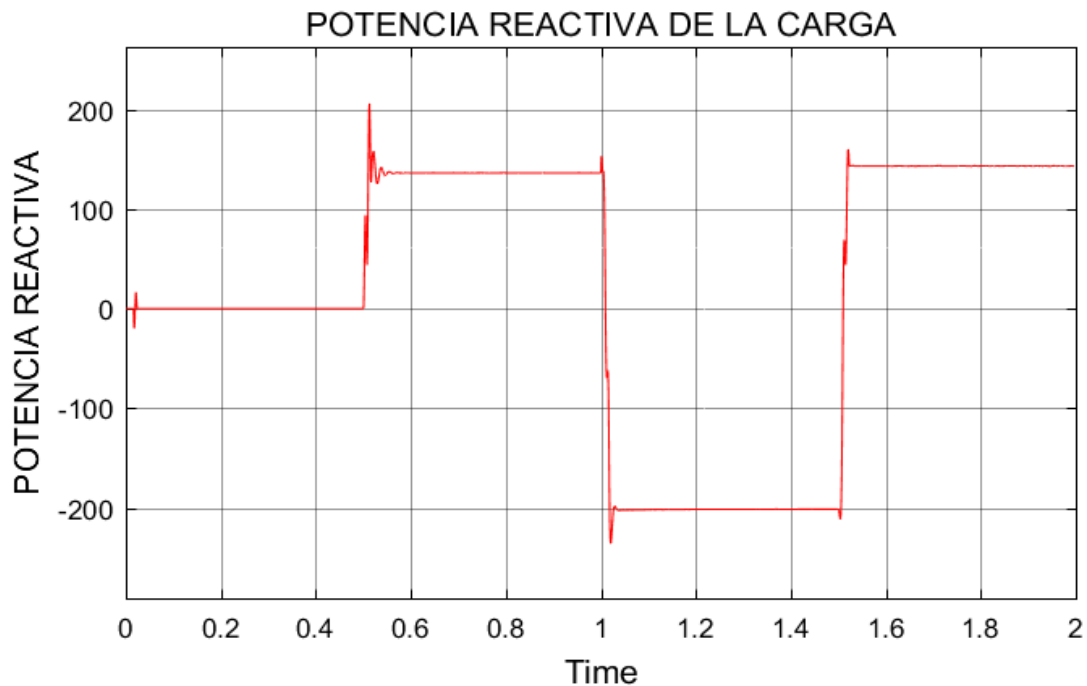


Figura 47. Potencia reactiva de la carga. Fuente: Elaboración propia.

9.1.3 FACTOR DE POTENCIA

En la figura 48, se indican valores de factor de potencia variables que oscilan en rangos de 0 a 1 debido a las cargas resistivas, capacitivas e inductivas presentes en el sistema monofásico planteado, las oscilaciones en cada cambio de carga se deben al switcheo de los breakes que conmutan para establecer otra carga.

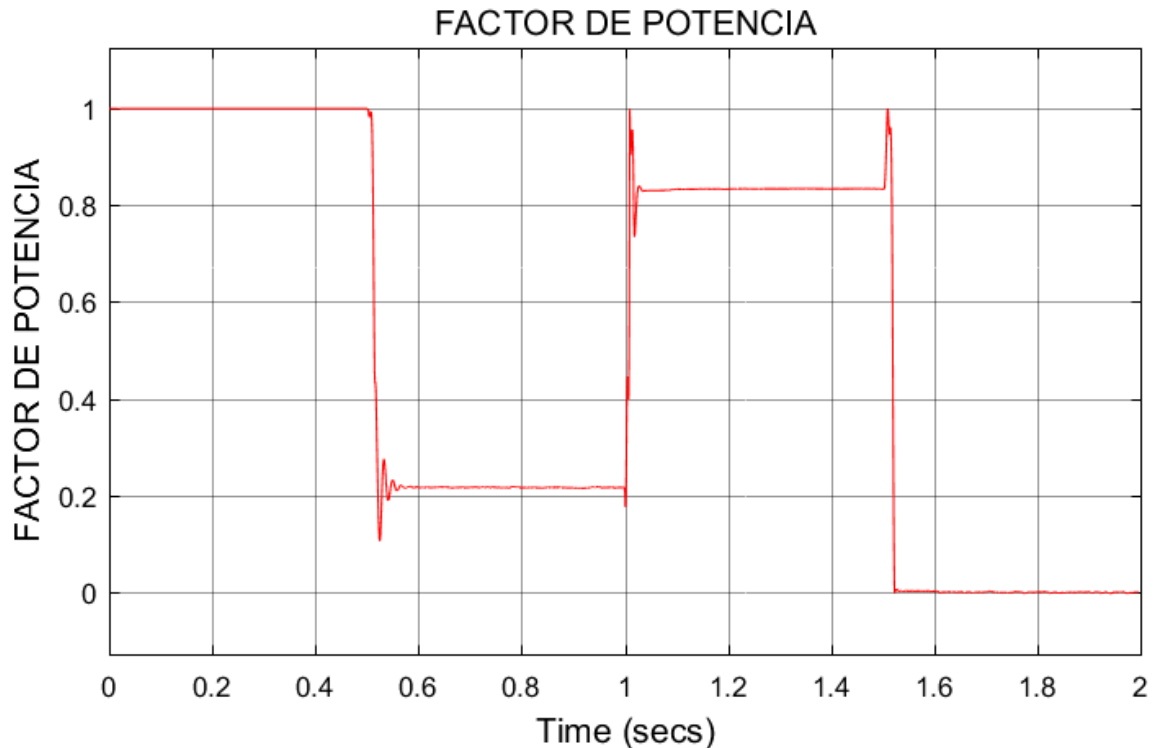


Figura 48. Factor de potencia. Fuente: Elaboración propia.

9.1.4 PERFIL DE TENSIÓN DE LA RED

En la figura 49, se refleja el voltaje sinusoidal en la red en la cual no se observan fluctuaciones que afectan el sistema de manera relevante ya que las cargas están conectadas en paralelo por tanto el voltaje no presenta variaciones.

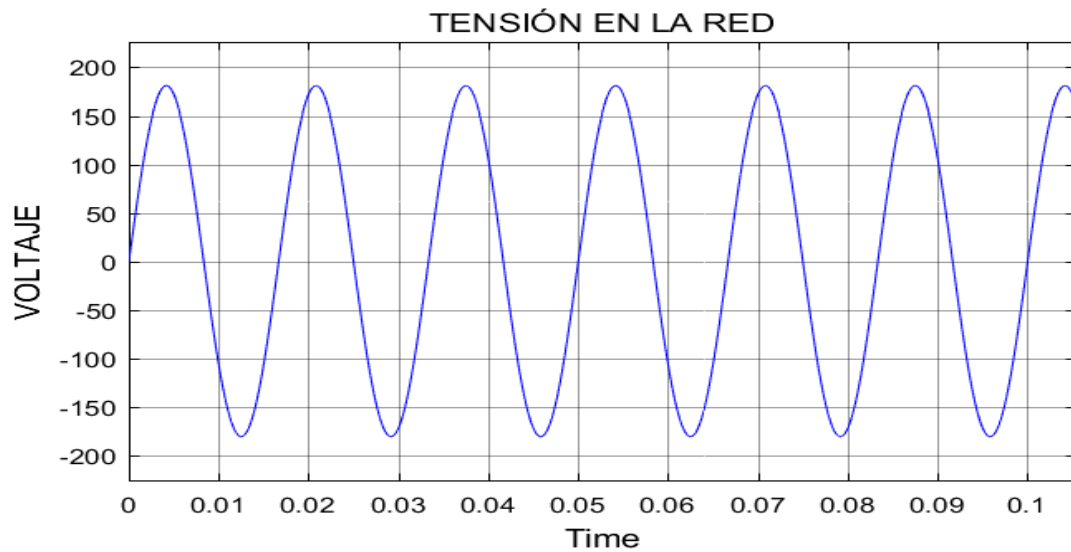


Figura 49. Perfil de tensión en la red. Fuente: Elaboración propia.

9.1.5 PERFIL DE CORRIENTES DE LA RED Y CARGA

En la figura 50, se expone una comparación de corrientes entre la salida de la red y la salida de la carga que permite observar que no hay un cambio entre ellas, debido a que las cargas están en serie con la fuente, el cambio de amplitud se debe al cambio de carga.

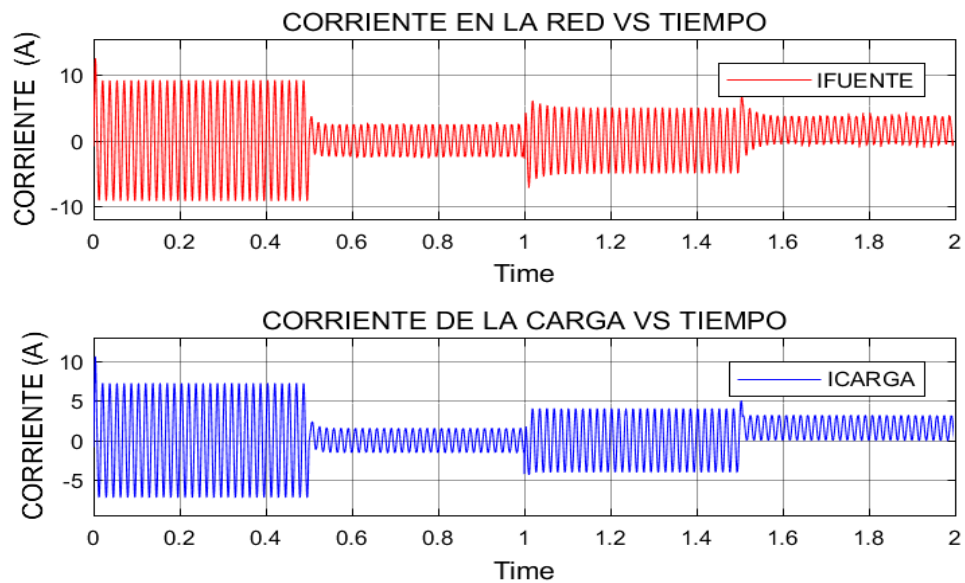


Figura 50. Perfil de corriente en la red y perfil de corriente en la carga. Fuente: Elaboración propia.

9.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA MONOFÁSICO CON PROTOTIPO

9.2.1 POTENCIA ACTIVA DEL SISTEMA

En la figura 51, se expresa una comparación entre la potencia activa que observa la red y potencia activa de la carga. La potencia en el sistema cambia con respecto a la de la carga, debido a la potencia activa que consume el prototipo en la carga del capacitor y filtro RL encontrándose un elemento resistivo que disipa dicha potencia.

En la figura 52, se observa un diagrama de barra que ilustra el cambio antes y después de la conexión del compensador entre la potencia activa de la carga y de la red.

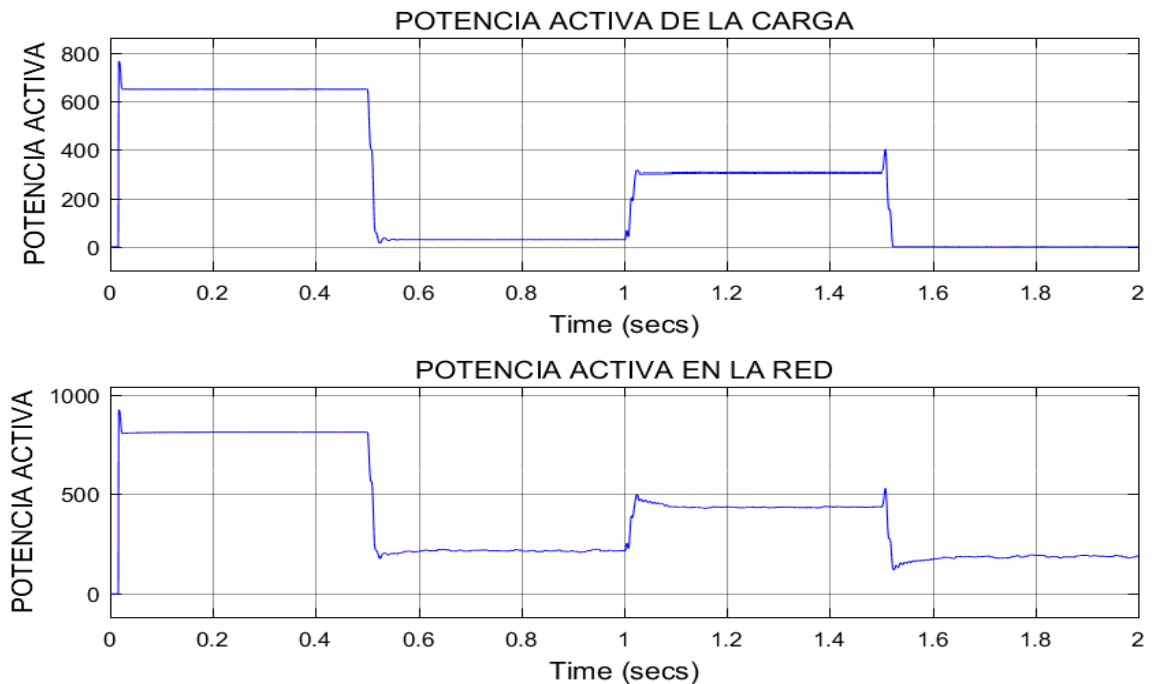


Figura 51. Potencia activa de la carga y potencia activa en la red. Fuente: Elaboración propia.

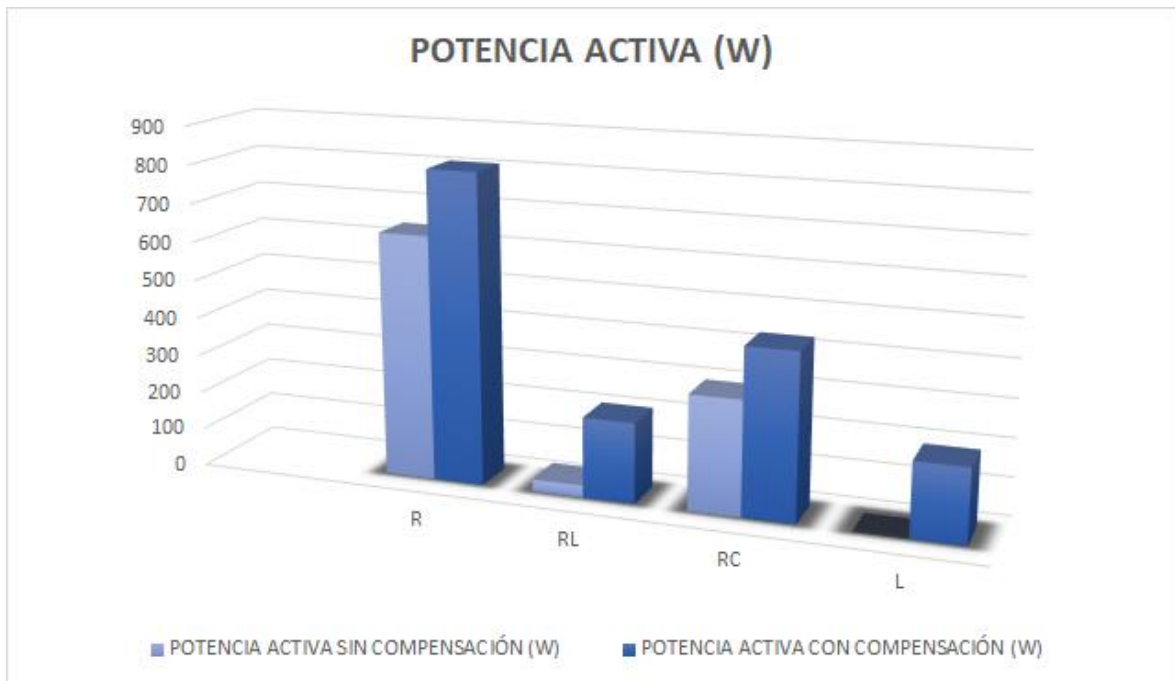


Figura 52. Comparación: potencia activa sin compensación y potencia activa con compensación con prototipo. Fuente: Elaboración propia.

9.2.2 POTENCIA REACTIVA DEL SISTEMA

En la figura 53, se expresa una comparación entre la potencia reactiva de la carga y la potencia reactiva que observa la red. La potencia en el sistema cambia con respecto a la de la carga, debido a que el control se programó con la opción de llevar a cero la potencia reactiva ya sea inductiva o capacitiva que genere la carga, en los tiempos donde se hace el cambio de carga se aprecia un transitorio el cual depende del tipo de carga y la corriente que circule por ella, en cada instante de tiempo, ocasionando que la red suministre esos pequeños transitorios de energía reactiva.[22]

En la figura 54, se observa un diagrama de barra que ilustra el cambio antes y después de la conexión del compensador entre la potencia reactiva de la red y de la carga.

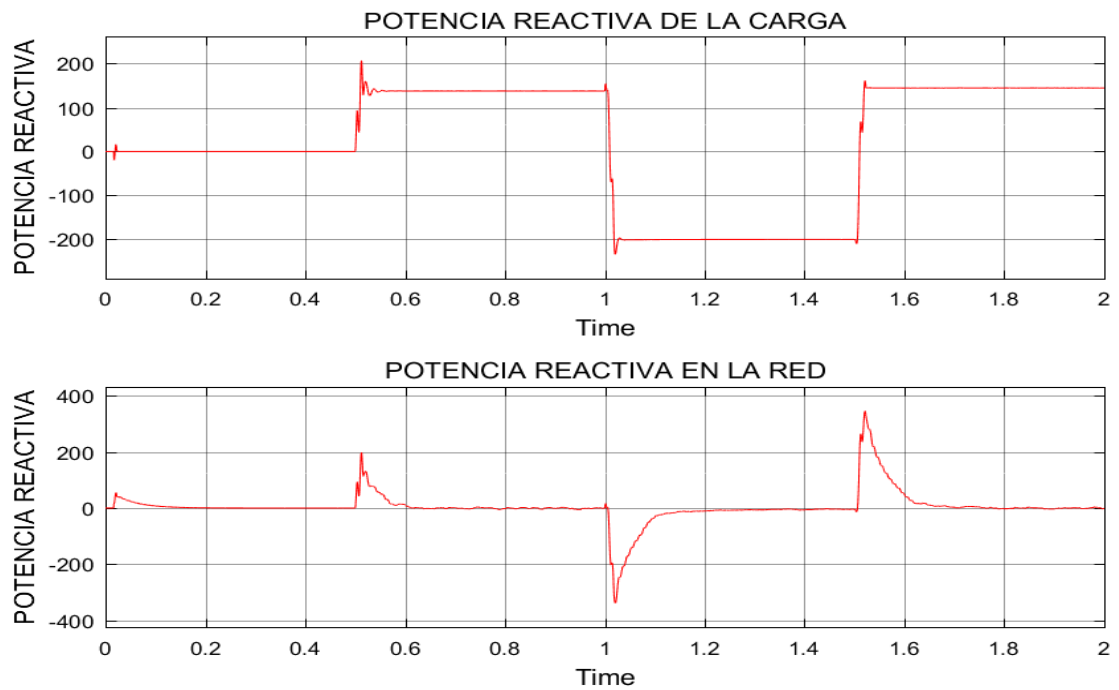


Figura 53. Potencia reactiva de la carga y potencia reactiva en la red. Fuente: Elaboración propia.

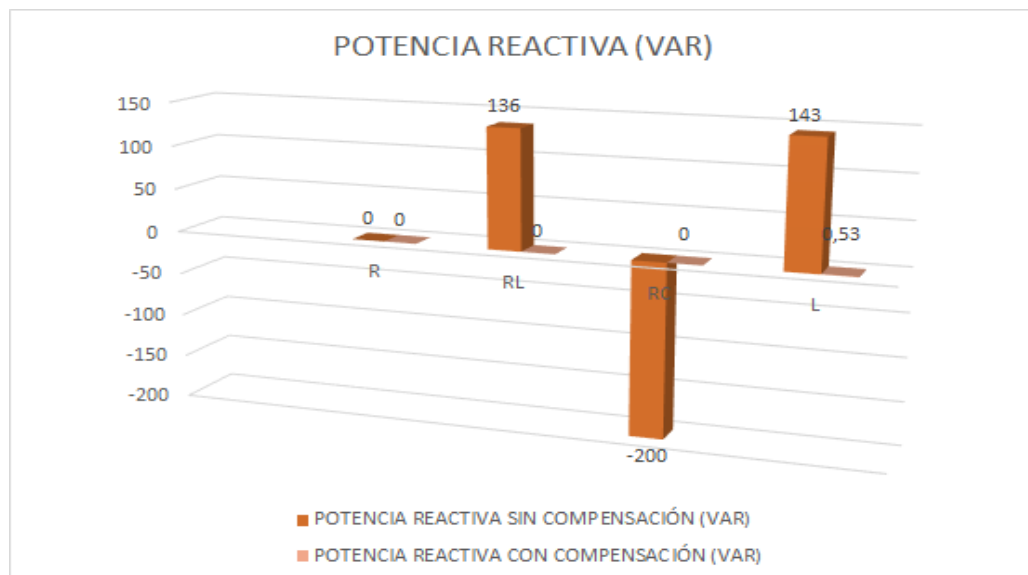


Figura 54. Comparación: potencia reactiva sin compensación y potencia reactiva con compensación con prototipo. Fuente: Elaboración propia.

9.2.3 FACTOR DE POTENCIA

En la figura 55, se compara el factor de potencia en un transcurso de 2 segundos entre la carga antes y después del punto común de acople del prototipo, se siguen presentando los transitorios debido al cambio de posición del switch que controla la entrada de cada carga, se evidencia la corrección del fp en cada carga en donde se observa el transitorio referente a la corrección que ejerce el compensador, al entrar en la carga netamente resistiva a los 0 segundos de simulación el compensador no genera ninguna corriente que modifique el desplazamiento de la onda para potencia reactiva dando el factor de potencia de la carga resistiva (fp de 1), al realizar el cambio a los 0.5 y 1 segundos se ve la respuesta natural de un circuito RL y RC respectivamente, esta respuesta también se aprecia mejor en la gráfica 8, independiente del valor del factor de potencia de cada carga, se aprecia como el controlador PID lo lleva a 1 en un tiempo determinado, la carga netamente inductiva tiene un tiempo de sincronización levemente más largo que las anteriores cargas, igualmente su fp es más bajo este motivo se debe que la corriente en una inductancia cambia gradualmente o no puede cambiar bruscamente a diferencia de las cargas que tienen disipadores de potencia activa que evitan sobre picos de corrientes que por lo general actuarían como filtros.

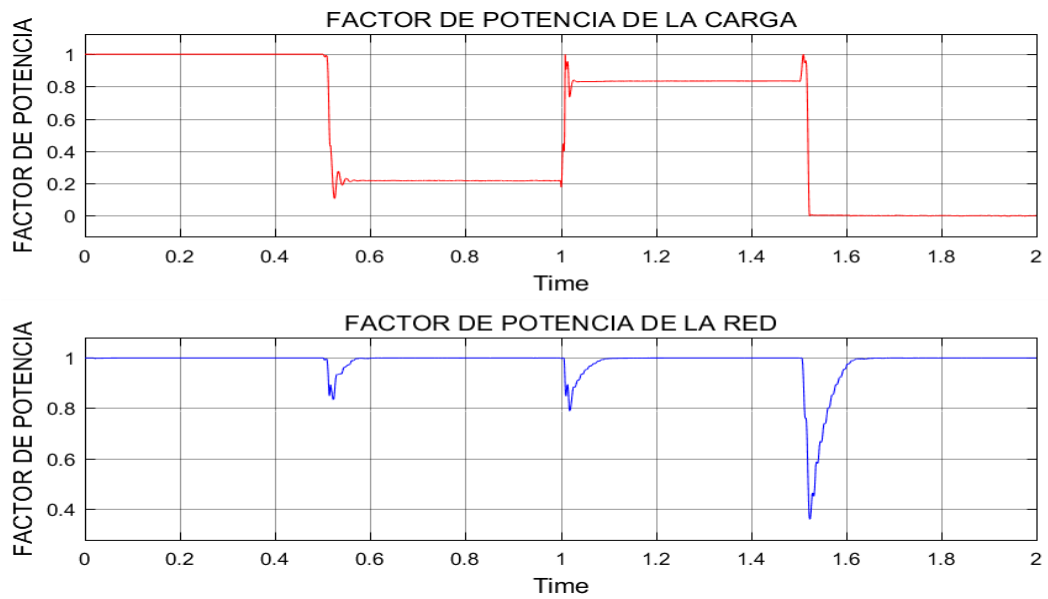


Figura 55. Factor de potencia de la carga y factor de potencia corregido. Fuente: Elaboración propia.

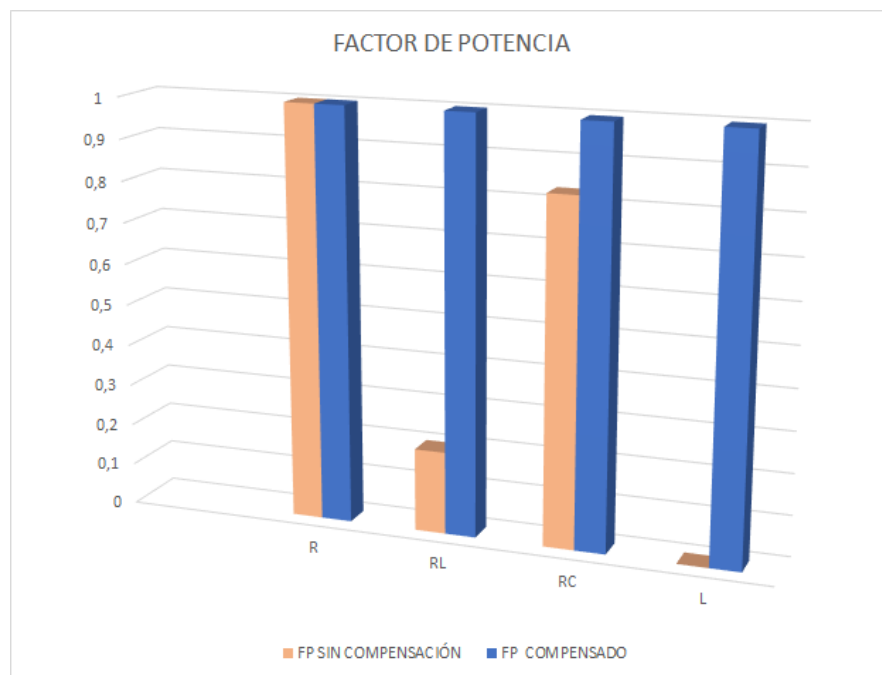


Figura 56. Comparación: factor de potencia sin compensación y actor de potencia con compensación con prototipo. Fuente: Elaboración propia.

9.2.3 COMPENSACIÓN DEL SISTEMA

En la figura 57, se tiene la señal de voltaje y corriente antes y después del punto común de acople del prototipo, la señal de voltaje está multiplicada por una ganancia de 0.05 con fines prácticos, para poder apreciar el desfase que existe entre la corriente y voltaje en el sistema.

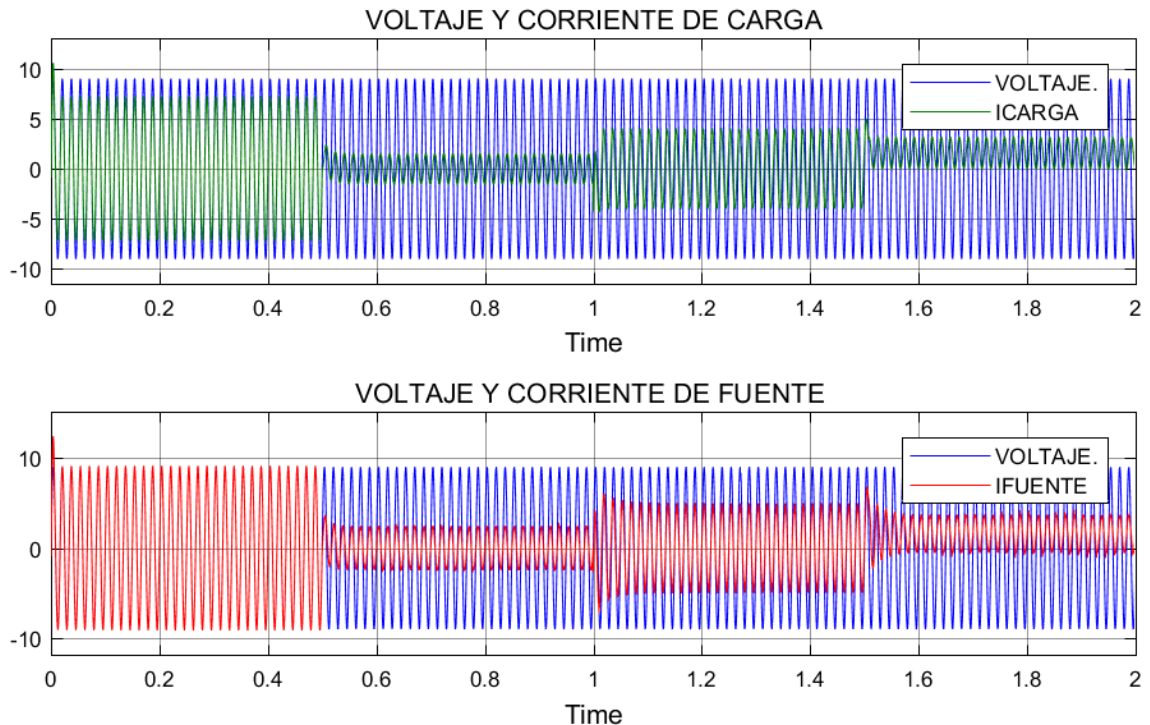


Figura 57. Comportamiento de la compensación del sistema. Fuente: Elaboración propia.

9.2.3.1 ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE LA CARGA R

En la figura 58, se observa el desfase entre el voltaje y la corriente de la carga resistiva antes y después de la compensación, la corriente que se tiene en la fuente es mayor a la de la carga debido a lo mencionado en la gráfica 6, la alteración se debe a la potencia que requiere el prototipo para funcionar.

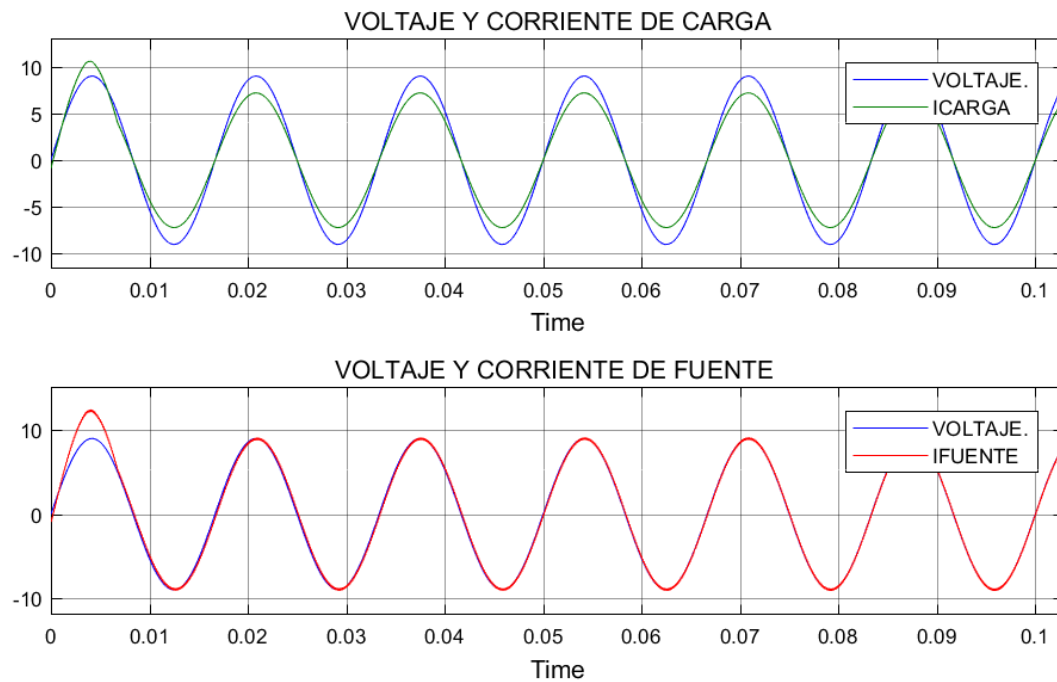


Figura 58. Comportamiento de la compensación del sistema con carga R. Fuente: Elaboración propia.

9.2.3.2 ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE LA CARGA RL

En la figura 59, se expone el desfase que existe entre el nivel de tensión y la intensidad corriente de la carga RL, en la parte superior está la corriente y el voltaje antes del punto común de acople, se evidencia el desfase que genera dicha carga estableciendo el factor de potencia el cual depende netamente del valor de R y L del circuito, en la parte inferior se observa la corriente de dicha carga con la acción del compensador, el rizado se debe a la conmutación de los IGBT, el retraso en los primeros ciclos se debe a que la compensación no es instantánea y requiere de tiempo de acción del compensador, que es ajustado por el PID cuando analiza el error de las corrientes de la del sistema y el set Point establecido.

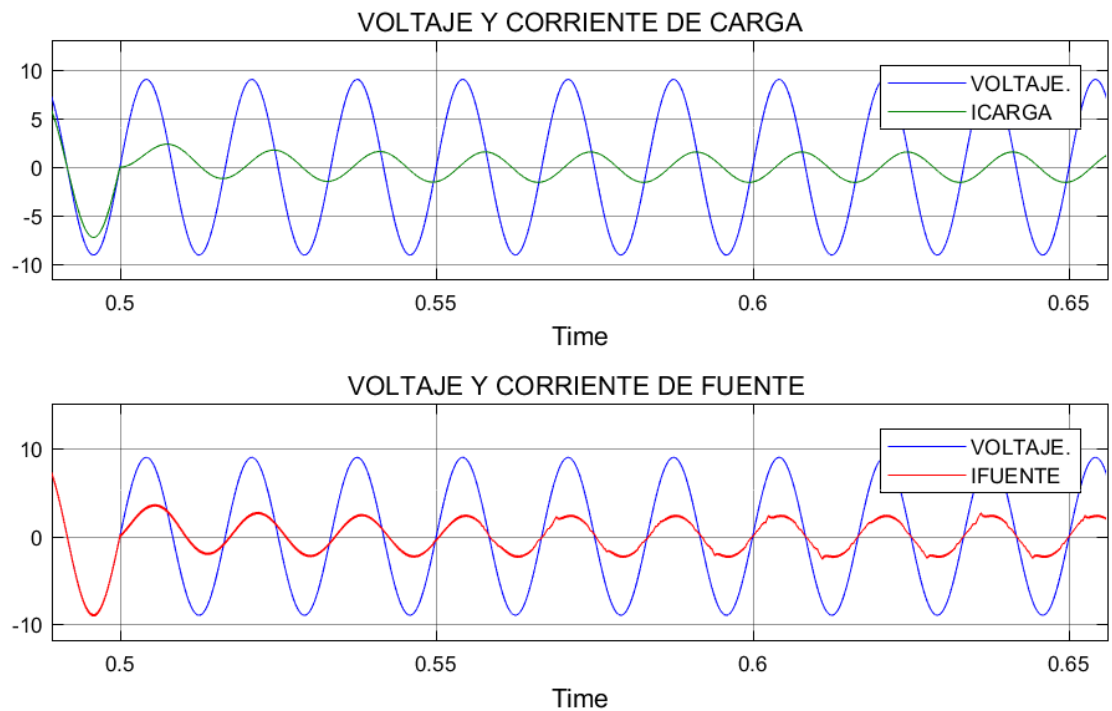


Figura 59. Comportamiento de la compensación del sistema con carga RL. Fuente: Elaboración propia.

9.2.3.3 ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE LA CARGA RC

En la figura 60, se tiene la comparación de la carga RC entre el voltaje y la corriente que observa la red antes y después de la conexión del prototipo, la corriente atrasa el voltaje debido al capacitor que se observa en la carga, y así mismo, la resistencia utilizada evita que entre en cortocircuito el capacitor, en la gráfica inferior se observa como el compensador corrige la onda inyectando la corriente necesaria en este caso actuando en un modo de operación inductivo como lo describen las bases teóricas consultadas, para compensar la carga capacitiva, cabe resaltar que este tipo de cargas son poco comunes en las instalaciones residenciales monofásicas [22].

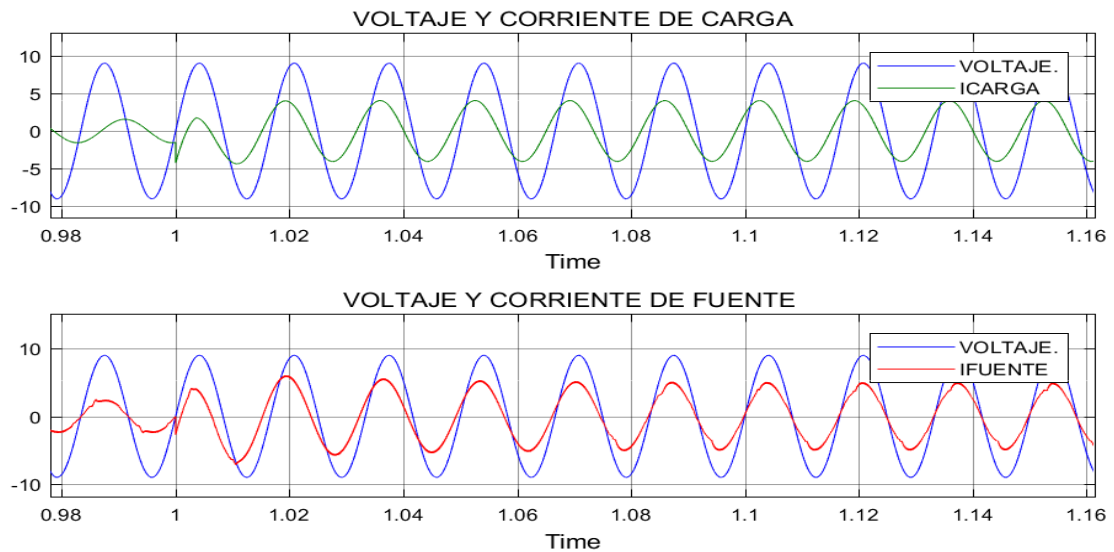


*Figura 60. Comportamiento de la compensación del sistema con carga RC.
Fuente: Elaboración propia.*

9.2.3.4 ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE LA CARGA L

En la figura 61, se presenta el peor escenario posible en donde el factor de potencia es cero, debido a la carga netamente inductiva que se utilizó para fines de simulación, de igual forma independientemente de la naturaleza de la carga el compensador corrige el factor de potencia llevándolo prácticamente a 1.

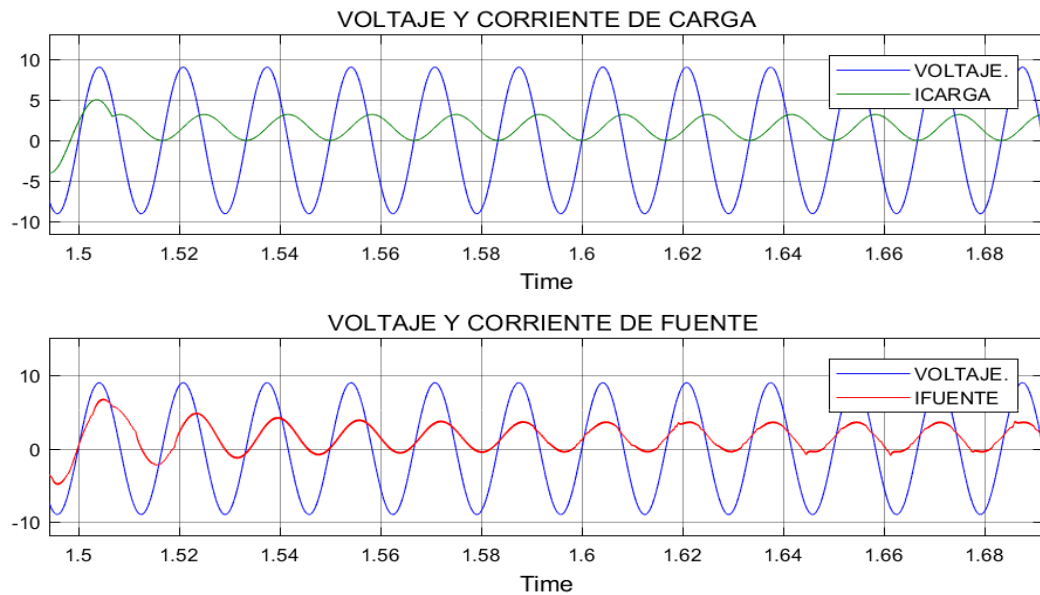


*Figura 61. Comportamiento de la compensación del sistema con carga L Fuente:
Elaboración propia.*

10. SISTEMAS BIFÁSICO Y TRIFÁSICO

10.1 ANÁLISIS CON CARGA BIFÁSICA

Los sistemas bifásicos residenciales trifilares convencionales se componen por circuitos monofásicos y bifásicos para cargas distribuidas en dos fases por tal motivo el prototipo puede satisfacer las necesidades de compensación para dichas cargas a través de un análisis por fase como se presenta en la figura 62 en donde se establece una carga conectada a dos fases de voltaje nominal de 220 V con una potencia reactiva inductiva aproximada de 430 VAR, se realiza una copia del prototipo y se conecta a cada una de las fases.

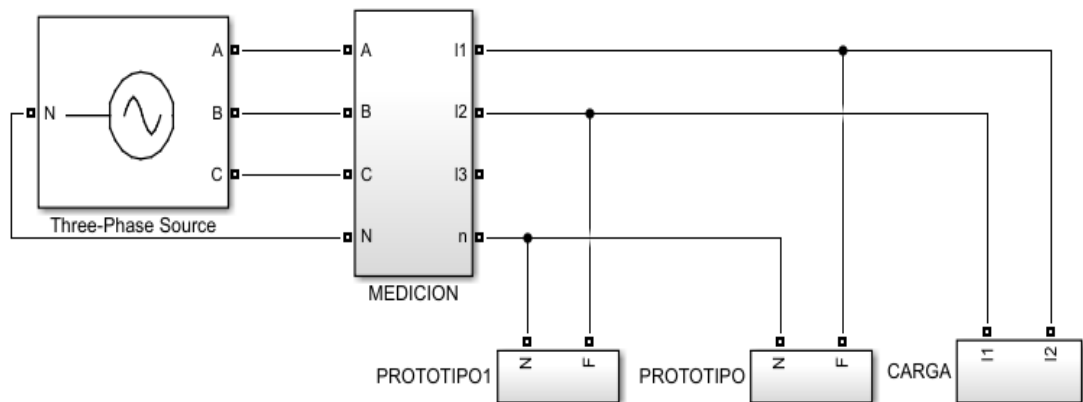


Figura 62.carga bifásica con prototipo Fuente: Elaboración propia.

En la figura 63 se aprecia el factor de potencia por fase de la carga en donde el dispositivo cumple con la principal función de compensar la potencia reactiva, se aprecia que los tiempos de compensación son diferentes esto se debe al orden en los que la señal de medición llega a cada prototipo esto genera un pequeño retardo en la compensación mostrando que las señales no sean simétricas, por tal motivo la red debe suministrar estos pequeños reactivos en un tiempo no mayor a 0.2 milisegundos

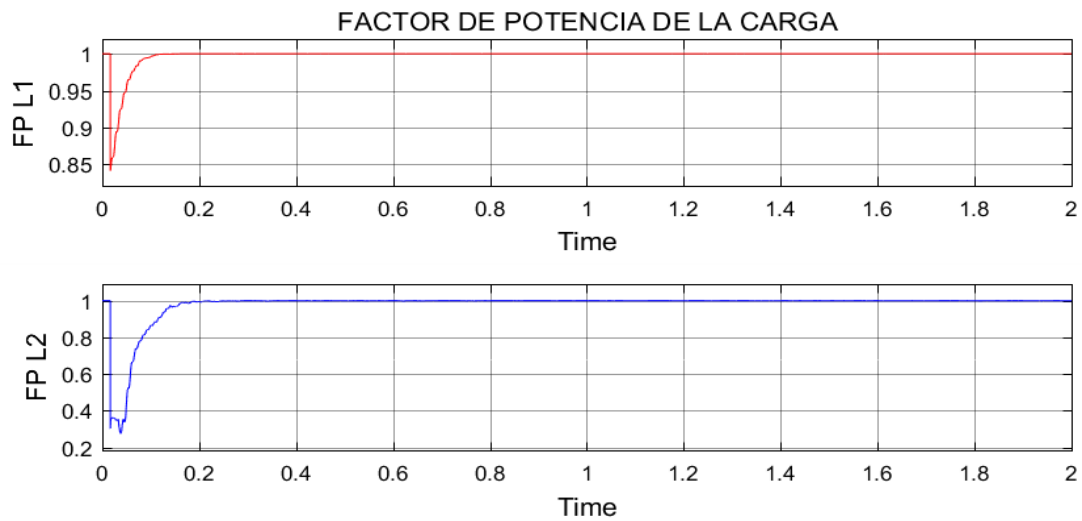


Figura 63. factor de potencia por fase L1 Y L2. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 64, se adicionan las cargas monofásicas vistas en la figura 45 conectándose a una de las fases (L2).

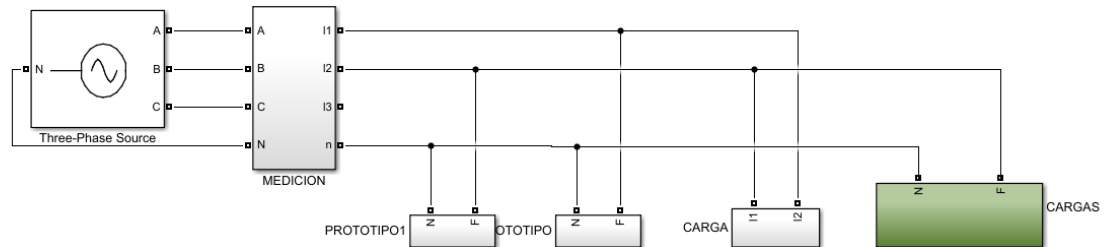


Figura 64. Carga bifásica y monofásica con prototipo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 65 se observa el comportamiento del fp de cada una de las fases, en la parte superior el comportamiento de la fase A, conectada específicamente a la carga bifásica, se observa el pico característico que necesita para comenzar a compensar y los reactivos que debe aportar o consumir la red, en la parte inferior en azul se observa el comportamiento de las cargas ya analizadas (ver sección 9)

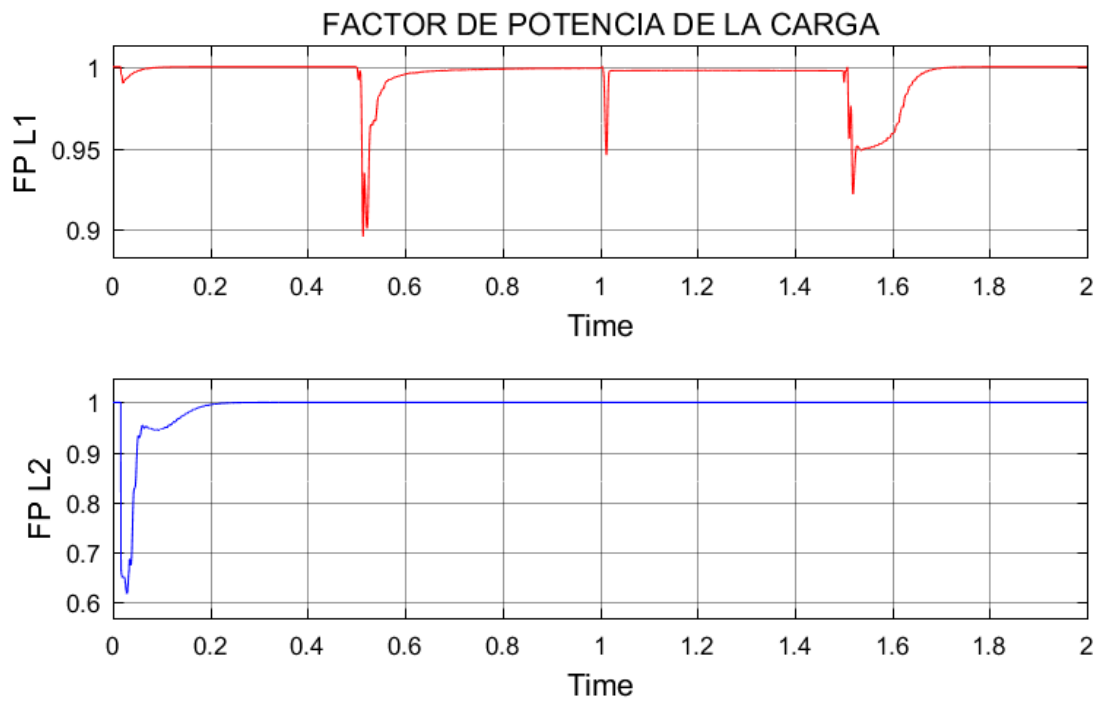


Figura 65. factor de potencia por fase con carga monofásica. Fuente: Elaboración propia.

10.2 ANÁLISIS EN LOS SISTEMA RESIDENCIALES TRIFÁSICO

Los sistemas trifásicos residenciales trifilares normalmente se componen por circuitos monofásicos y bifásicos para cargas distribuidas en tres fases, el prototipo puede retribuir los efectos de compensación para dichas cargas a través del análisis por fase como se presenta en la figura 66 en donde se establecen unas cargas bifásicas conectadas a tres fases de voltaje nominal de 220 V, junto con las cargas monofásicas ya analizadas [27].

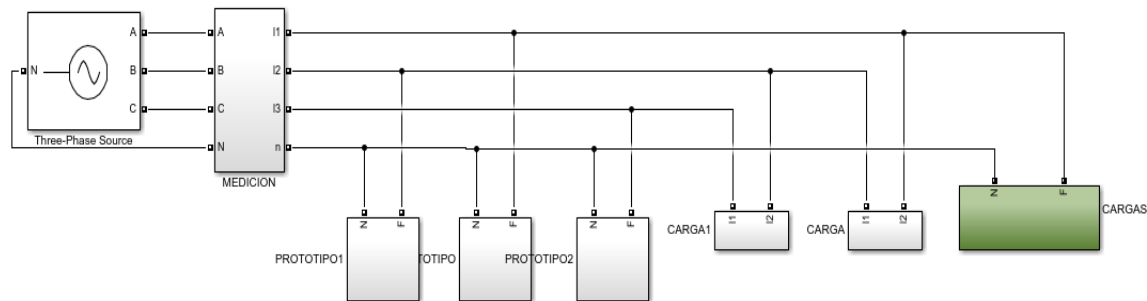


Figura 66. Cargas bifásicas con prototipos en instalaciones trifásicas. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 67 se observa el comportamiento del factor de potencia por fase, en la parte superior el comportamiento de la fase L1 que alimenta las cargas monofásicas y una carga bifásica, posteriormente, las dos fases L2 Y L3 que alimentan a cargas bifásicas que se comportan similarmente en cuanto a la corrección del factor de potencia, debido a que son cargas inductivas, el pequeño retardo se establece a partir de que la carga 2 tiene una resistencia que aporta un consumo de activa variando la intensidad de la corriente que pasa por la carga.

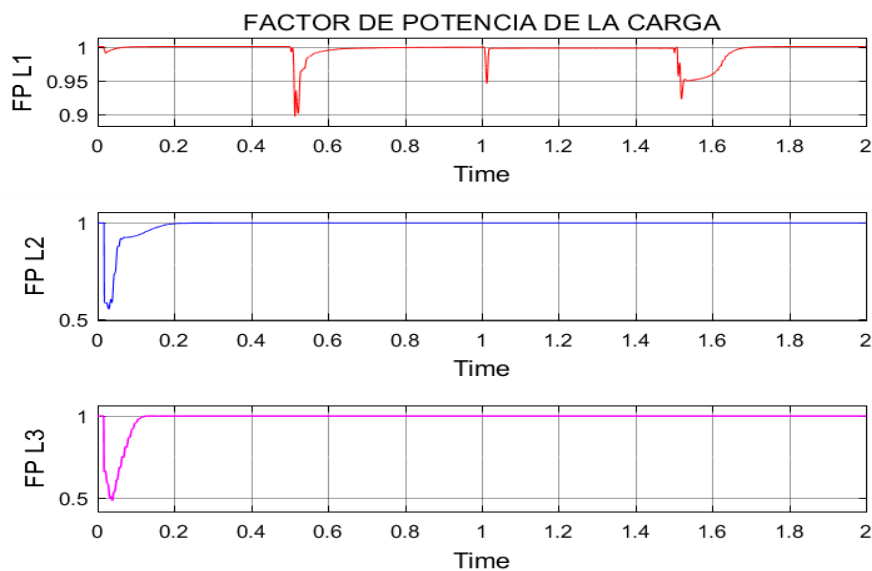


Figura 67. factor de potencia por fase L1, L2 Y L3. Fuente: Elaboración propia.

Para cargas trifásicas como motores o equipos trifásicos que requieran la utilización de las tres fases existen artículos que establecen prototipos ya dispuestos que se encaminan al mismo objetivo de compensación de reactivos de manera económica como lo es un el *control síncrono de un d-statcom de bajo costo* donde el fin es mejorar el factor de potencia de una carga capacitiva o inductiva de sistemas de distribución a partir de las técnicas que se nombran en el capítulo 2 [22].

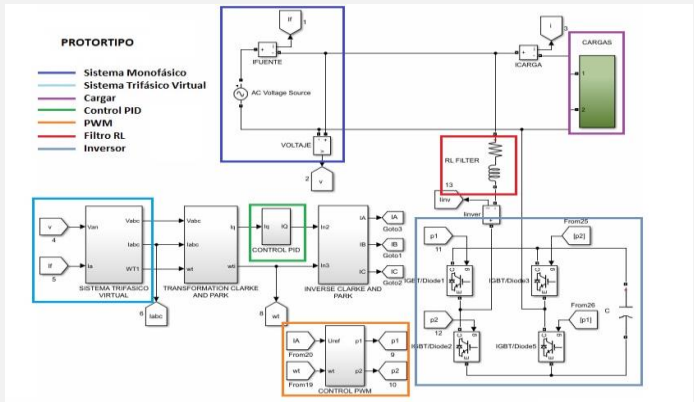
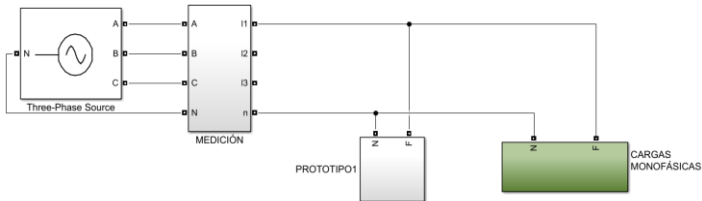
11. COMPARACIÓN EN SISTEMAS MONOFÁSICOS BIFÁSICO Y TRIFÁSICO

Las simulaciones se realizaron para resolución del problema de reactivos generados o consumidos por usuarios residenciales conectados al sistema eléctrico, esto se enfoca principalmente a usuarios monofásicos en donde las cargas requieren de un sistema eléctrico con neutro, a partir de ahí se expandió al sistemas bifásicos y trifásicos analizados por fase.

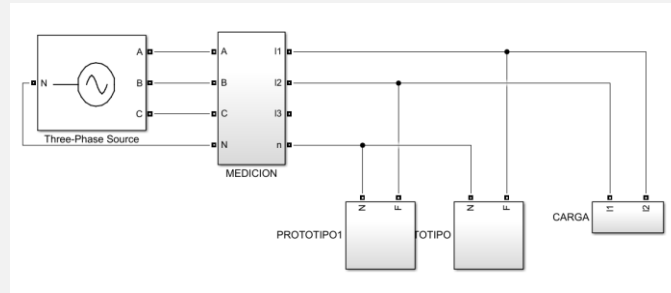
En el sistema monofásico presenta un conjunto de cargas que establecen una única corriente total a corregir el cual con un solo prototipo se puede realizar la compensación, la cual sería la mayor diferencia con las demás simulaciones ya que los sistemas bifásicos y trifásicos requerirán dos y tres prototipos respectivamente debido al análisis fasorial al cual está diseñado.

El sistema bifásico al requerir un segundo prototipo permite la compensación de la corriente en cualquiera de las fases la cual puede tener un nodo común para cargar que requieran alimentación 110 voltios fase neutro y 220 voltios fase a fase, anterior mente se realizaron dos simulaciones, la primera con una cargar que se alimenta de dos fases (220 voltios) ver figura 62, la segunda agregando las cargas monofásicas ver figura 64, en estos dos casos, la manera más relevante de observar la funcionabilidad del prototipo es a través de la corrección del factor de potencia en cada línea de alimentación ver figura 65.

El sistema trifásico planteado requiere de tres prototipos que al igual que el sistema bifásico permite la conexión de cargas bifásicas y monofásicas que compartan un mismo nodo ver figura 66, al ser residencial no se analizaron cargas trifásicas si no que se especificó que son cargas bifásicas y monofásicas distribuidas en una instalación trifásica con neutro siendo esta la diferencia con respecto al sistema bifásico anterior.

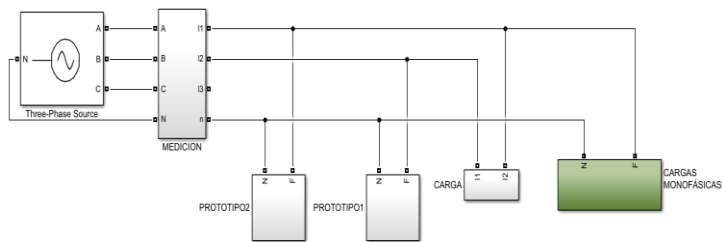
Simulación	Esquema	Descripción
<i>Simulación prototipo</i>		Simulación a partir de la apropiación de información para la obtención de parámetros del prototipo
<i>Cargas monofásicas</i>		Compensación de una única corriente, conexión paralela a la carga.

*Carga
bifásica*



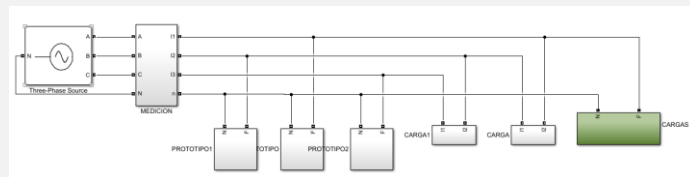
Compensación por fase, con dos prototipos para la corrección de FP producido por carga alimentada por dos fases.

*Cargas
bifásica y
monofásica*



Compensación por fase, para líneas no balanceados, donde las cargas monofásicas y bifásica comparten un nodo.

*Cargas
bifásica y
monofásica
en un
sistema
trifásico*



Compensación con tres prototipos, análisis por fase para la corrección del factor de potencia, dos cargas bifaciales que comparten una única línea para la corrección de una corriente compuesta de dos corrientes, una línea alimenta un carga bifásica y monofásica para el análisis de corrientes cambiantes en el tiempo.

Tabla 2. Comparación simulaciones.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las técnicas seleccionadas establecen diferentes parámetros que van orientados a la compensación de reactivos aplicadas a sistemas de potencia donde se observan las diferentes topologías que se centran principalmente en inversores.
- Se seleccionó la técnica Shunt (condensador en derivación), debido a que presenta características que va acorde a lo que se requería implementar como los materiales, y otras mejoras en la construcción de los condensadores, que conllevan disminuciones significativas en el precio y tamaño. Puesto que la implementación va orientada a que sea accesible económicamente.
- Este libro presenta varias topologías que se utilizan en sistemas de distribución trifásicos trifilares y trifásicos tetrafilares, es por ello que la investigación se fundamentó tomando como referencia el dispositivo D-STATCOM donde se hizo hincapié en tomar las bases teóricas del mismo y tener una guía para realizar el diseño de este prototipo.
- Se estableció la topología de puente completo debido a su fácil implementación con ello se observa que el prototipo se ajusta a costos bajos debido a su sencillez.
- Este diseño puede presentar falencias en el momento de compensar cargas reactivas elevadas, debido a que entra a un estado de sobre modulación afectando los pulsos PWM.
- Se recomienda realizar un control de la corriente ID para mitigar la potencia activa que consume el filtro pasa baja y la que requiere el condensador del

prototipo para que este mantenga en un estado de voltaje constante. Y así mismo, se eligió un voltaje del condensador igual al sistema con la finalidad de garantizar la transferencia de energía.

- se recomienda implementar red Snubber para mejorar la eficiencia del inversor, reducir los transitorios y el ruido producido por el cambio de estado de los IGBT.
- El bucle de enganche PLL de una fase implementada mostró un adecuado rendimiento en las condiciones, observando la sincronización de las fases virtuales, comprobando que a partir del sistema trifásico virtual se puede crear un control de potencia reactiva monofásica.
- La síntesis matemática de las transformadas Clarke y Park permitió un análisis simplificado de las mediciones a la hora de la aplicación del método de compensación trifásico para estimar la corriente de compensación para las instalaciones monofásicas.
- La investigación de un conjunto experimental sobre un sistema de compensación residencial monofásica real aún está en desarrollo y con este trabajo se pretende realizar un aporte al contenido bibliográfico existente.
- La simulación y los resultados experimentales verificaron que el convertidor propuesto no solo logra la corrección del factor de potencia, sino que también se autoajusta en los cambios de carga debido al lazo cerrado que controla el PID
- Con el presente trabajo se refuerzan las investigaciones que se enfocan a la compensación de reactivos en sistemas monofásicos a partir de la

aplicación del método que se utiliza habitualmente en el control de campo orientado de máquinas de CA de tres fases.

- El prototipo logra compensar cargas a bifásicas mediante una conexión y por fase siempre y cuando las instalaciones cuenten con neutro.
- El prototipo realiza sus funciones en instalaciones residenciales trifásicas en donde las cargas están distribuidas en fase y neutro, para cargas trifásicas como motores se recomienda la utilización o análisis por las diferentes topologías o técnicas de compensación vista en las secciones 5 y 6.
- La comparación de las simulaciones permite establecer los distintos escenarios de trabajos en los que se podría desempeñar el prototipo, dando un uso extra a los niveles de carga para los cuales fue diseñado.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión De Regulación de Energía Y. Gas CREG. (s. f.). *CONCEPTO 6975 DE 2020*. <https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/index.html>, 2020.
- [2] Q. Para, O. El, T. De, E. Gómez, and M. México, “*Escuela Superior De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica Unidad Profesional Adolfo López Mateos Departamento De Ingeniería Eléctrica Compensación De Potencia Reactiva Tesis Ingeniero Electricista Presenta Instituto Politécnico Nacional*,” 2009.
- [3] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas 5ta Edición*, vol. 5. 2012.
- [4] M. Angel and S. Cortés, “*Calidad de la Energía Eléctrica*,” 2009.
- [5] P. F. Guerra Valdés “*Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Sistemas Zonales Y Propuesta De Criterios Para La Compensación En Subestaciones At / Mt Memoria Para Optar Al Título De Profesor Guía : Deninson Fuentes Del Campo Miembros De La Comis*,” 2018.
- [6] J. M. D. L. R. Yusta Loyo, «*Tecnología eléctrica*,» Zaragoza, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2011, 2011, p. 413.
- [7] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, Ministerio de Minas y Energía, y República de Colombia, “*Resolución CREG No. 015 de 2018*,” Resolución 015 de 2018. p. 239, 2018, [Online]. Available:

<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac?OpenDocument>, 2018.

[8] A. Contreras, J. *Inversores su uso y aplicación*. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2000.

[9] D. Restrepo, "*Dimensionamiento De Bancos De Capacitores Automáticos Para Las Subestaciones Eléctricas 14,15 y 16 De La Empresa Compañía De Empaque S.A.*," *Dimens.* p. 156, 2020, [Online]. Available: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18456/14/RestrepoDiego_2021_DimensionamientoBancoCapacitores.pdf, 2017.

[10] N. Kumar y O. Buwa, "A review on reactive power compensation of distributed energy system," 2020 7th Int. Conf. Smart Struct. Syst. ICSSS 2020, pp. 16–21, doi: 10.1109/ICSSS49621.2020.9202249, 2020.

[11] K. Prabha, "[Prabha Kundur] Power System Stability and Control.Pdf." p. 1176, 1994.

[12] S. M. Halpin and A. Card, *Power quality*, Third Edit. Elsevier Inc., 2011.

[13] C. Ghiță, A. Crăciunescu, V. Năvrăpescu, I. D. Deaconu, A. I. Chirilă, y I. —. D. Ilina, "*Optimal reactive power compensation using synchronous generators*," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 8, pp. 747–750, 2010, doi: 10.24084/repqj08.461.

[14] C. Jos y C. Gonz, "*Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC),*" 2003.

[15] W. Hosny, B. Dobrucky y M. pokorny, "Rendimiento dinámico de filtros de potencia activa monofásicos utilizando una estrategia virtual de dos ejes", 44^a

Conferencia Internacional de Ingeniería de Potencia de Universidades (UPEC) , 2009, págs. 1-5.

[16] N. Kumar and O. Buwa, "A review on reactive power compensation of distributed energy system," 2020 7th Int. Conf. Smart Struct. Syst. ICSSS 2020, pp. 16–21, 2020, doi: 10.1109/ICSSS49621.2020.9202249.

[17] A. Moreno-Muñoz, *Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment*, Córdoba, 2007.

[18] M. Kullan, R. Muthu, J. B. Mervin, and V. Subramanian, "Design of DSTATCOM Controller for Compensating Unbalances," *Circuits Syst.*, vol. 07, no. 09, pp. 2362–2372, 2016, doi: 10.4236/cs.2016.79197.

[19] T. U. Okeke and R. G. Zaher, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)," 2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708208.

[20] B. Almánzar, I., Aybar Mejía, M. E., Blanco, M., & Vicini H., R. A. (2020). *Compensación de reactivos en instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos penalizadas por bajo factor de potencia.*

[21] P. Negi, Y. Pal, and G. Leena, "A review of various topologies & control schemes of DSTATCOM implemented on distribution systems," *Majlesi J. Electr. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 25–34, 2017.

[22] J. C. Mendoza-Niebles, L. D. Pabon-Fernandez, E. A. Caicedo-Peñaranda, A. Pardo-García, y J. L. Díaz-Rodríguez, "Control síncrono de potencia de un D-STATCOM de bajo costo," *Aibi Rev. Investig. Adm. e Ing.*, vol. 8, no. 3, pp. 108–117, 2020, doi: 10.15649/2346030x.881.

- [23] O. Microsemi, "*Park, Inverse Park And Clarke, Inverse Clarke Software, Transformations MSS Implementation*," Microsemi, pp. 5–7, 2013.
- [24] K. Liang, S. Huang, H. Shen, F. Li, and L. Liu, "*Switch-linear hybrid analysis and application in reactive power compensation of single-phase SVG*," *Proc. - 2017 32nd Youth Acad. Annu. Conf. Chinese Assoc. Autom. YAC 2017*, pp. 715–719, 2017, doi: 10.1109/YAC.2017.7967502.
- [25] B. Dobrucky, H. Kim, V. Racek, M. Roch, and M. Pokorny, "*Single-phase power active filter and compensator using instantaneous reactive power method*," *Proc. Power Convers. Conf. 2002, PCC-Osaka 2002*, vol. 1, pp. 167–171, 2002, doi: 10.1109/PCC.2002.998541.
- [26] Z. Shu, S. Xie, and Q. Li, "*Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system*," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 2, pp. 334–343, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2060360.
- [27] G. Zhong Ye, "Compensación de potencia reactiva trifásica usando un convertidor CA / CA monofásico", *Actas de APEC 97 - Conferencia sobre electrónica de potencia aplicada*, 1997, págs. 213-219 vol.1, doi: 10.1109 / APEC.1997.581456.
- [28] W. Sawaengsinkasikit, K. Pipek y V. Tipsuwanporn, "Un inversor PWM monofásico que controla basado en compensación PLL con cargas no lineales", *2009 ICCAS-SICE*, 2009, págs. 871-876.
- [29] W. Hosny y B. Dobrucky, "Compensación de distorsión armónica y potencia reactiva en sistemas de potencia monofásicos utilizando la técnica de transformación ortogonal", *2007 42ª Conferencia Internacional de Ingeniería de Potencia de Universidades*, 2007, págs. 629-633, doi: 10.1109 / UPEC.2007.4469021.

LISTA DE ANEXOS

1. SIMULACIÓN PROTOTIPO EN INSTALACIONES MONOFÁSICAS.
2. SIMULACIÓN PROTOTIPO EN INSTALACIONES BIFÁSICAS.
3. SIMULACIÓN PROTOTIPO EN INSTALACIONES TRIFÁSICAS.