



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones



***RESTAURADOR DINÁMICO DE TENSIÓN (DVR): ANÁLISIS Y
ESTRATEGIAS DE CONTROL.***

***Christian Alexander Ardila Ríos
Alder Raúl Salamanca Ramírez***

***UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-
MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010***



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones



***RESTAURADOR DINÁMICO DE TENSIÓN (DVR): ANÁLISIS Y
ESTRATEGIAS DE CONTROL.***

***Christian Alexander Ardila Ríos
Alder Raúl Salamanca Ramírez***

***Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero
Electricista***

***Director:
PhD. Johann Farith Petit Suárez***

***Codirector:
Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos***

***UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-
MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010***

Dedicatoria

“A mis padres, a mis hermanos, a mis sobrinitos hermosos y a paolita, a todos ellos por su paciencia y colaboración les dedico mi más grande logro”.

Alder

Dedicatoria

A Dios fuente suprema de toda sabiduría y a la Santísima Virgen María, quienes me han acompañado y me han llenado de valor, sabiduría e inteligencia a lo largo de toda mi vida especialmente en estos últimos años durante el estudio de esta hermosa Ingeniería.

A mis padres quienes creyeron en mí y me apoyaron cuando decidí venir a estudiar a Bucaramanga especialmente en la UIS. A ellos les debo mi vida, por su apoyo incondicional y ejemplo pude lograr este sueño de ser profesional, sueño que por instantes pareció desvanecerse, pero hoy gracias a su entrega ya es una realidad.

A mis hermanos, quienes a pesar de la distancia siempre me acompañaron y apoyaron con una voz de aliento, voz de aliento necesaria en muchos momentos donde tal vez la soledad entra en nuestra vida y no nos dejar pensar en paz. Gracias hermanitos los quiero con todo mi corazón.

A mi abuela Deyanira de quien sé que en ningún momento dejo de orar por mi salud, bienestar y felicidad.

A Idania mi princesa, a quien quiero con todo mi corazón, con su apoyo y amor ha llenado de felicidad mi vida y me ha permitido disfrutar de todos mis días aquí en Bucaramanga.

Finalmente, como no dedicar este logro tan grande a quien me ofreció su apoyo, amistad y tiempo cuando lo más necesite y de quién he aprendido muchas cosas: William, usted más que un amigo es un hermano.

Christian Ardila Ríos

Agradecimientos

A Dios por cada instante de mi vida, a mis padres y hermanos por su incondicional apoyo y por creer en mí, a Paola por aguantarme cuando las cosas parecían no salir bien y por los momentos de felicidad y a mis grandes amigos Oscar, Gabriel y Nelson por estar siempre dispuestos a ayudarme cuando los necesite.

De igual manera y de forma muy especial agradezco al profesor Johann Petit y a María Alejandra por su esfuerzo y dedicación en este proyecto de grado. A mis profesores de clases por los conocimientos adquiridos y la UIS por brindarme la oportunidad de ser un excelente profesional.

A Christian por sus consejos, por su comprensión, por ser mi compañero de proyecto, en fin por todas esas cosas maravillosas que aprendí de él muchas gracias.

Alder Raúl Salamanca Ramírez

A Dios y a la Virgen María, quienes en ningún momento pueden dejarse de nombrar y amar. A toda mi familia, siempre los llevare en mi corazón.

Al Doctor Johann Petit y a la Ingeniera María Alejandra Mantilla Villalobos, a quienes admiro por su gran inteligencia y sabiduría, gracias a sus consejos y dedicación se pudo concretar la idea de este proyecto y su exitosa culminación.

Al Ingeniero Iván Serna por sus valiosas correcciones.

A Alder y a su familia por acogerme amablemente en su casa en los días que necesitamos trabajar para finalizar la escritura de este documento.

A los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones por el conocimiento que me transmitieron en cada clase que me permiten tener buenas bases en mi formación como profesional.

A la Universidad Industrial de Santander, que definitivamente es una de las mejores del país en especial en Ingeniería Eléctrica.

Christian Árdila Ríos

Contenido

1. Introducción.....	16
1.1. Perturbaciones de la onda de tensión	16
1.1.1. Huecos y elevaciones de tensión	16
1.1.2. Armónicos.....	17
1.1.3. Desequilibrios de tensión.....	18
1.2. Dispositivos de compensación.....	19
1.3. Organización del documento.....	20
2. Restaurador Dinámico de Tensión (DVR).....	22
2.1. Principio de operación	22
2.2. Topologías.....	23
2.2.1. Unidad de almacenamiento de energía.....	23
2.2.2. Convertidor	28
2.2.3. Filtro pasivo.....	31
2.2.4. Transformador de acoplamiento	34
2.3. Estrategias de compensación para el control de la barra de continua.....	35
2.3.1. Compensación pre-falla	35
2.3.2. Compensación en fase	39
2.3.3. Compensación de avance de fase o de energía optimizada [42], [49]	43
2.4. Cálculo de las referencias	55
2.4.1. Filtro de Kalman	56
2.4.2. Transformada de Park o DQ0.....	60
2.5. Control del Convertidor DC/AC.....	63
2.5.1. Control de histéresis	65
2.5.2. Control PI	66
2.5.3. Control Deadbeat.....	69
3. Parámetros y consideraciones de los modelos.....	72
3.1. Modelos de simulación	79
3.2. Especificaciones para señales de falla.....	82
4. Simulación y análisis de resultados.....	84
4.1. Resultados y análisis de simulación para modelos monofásicos.....	84
4.2. Resultados y análisis de simulación para modelos trifásicos.....	104
5. Conclusiones y recomendaciones.....	125
5.1. Observaciones y conclusiones	125
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros.....	126
Referencias.....	127
Anexos.	
Anexo A. Circuitos de simulación.	
Anexo B. Grafica de resultados de simulaciones adicionales.	

Lista de tablas

Tabla 2.1. Capacidad de tensión y velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia.	28
Tabla 3.1. Datos del transformador B del CENTIC.	72
Tabla 3.2. Datos del transformador del DVR con filtro RLC.....	76
Tabla 3.3. Datos del transformador del DVR con filtro C.....	77
Tabla 3.4. Perturbaciones a simular modelo monofásico DVR.....	83
Tabla 3.5. Perturbaciones armónicas a simular modelo monofásico DVR.....	83
Tabla 3.6. Perturbaciones a simular modelo trifásico DVR.....	83
Tabla 3.7. Perturbaciones permanentes a simular modelo trifásico DVR.	83

Lista de figuras

Figura 1.1 Hueco de tensión.	16
Figura 1.2 Elevación de tensión	17
Figura 1.3. Componentes armónicas en una señal de tensión.	18
Figura 1.4. Magnitud del espectro armónico de la señal de tensión.....	18
Figura 1.5. Desequilibrios de tensión.....	19
Figura 1.6. Topología típica del DVR (representación por fase).	20
Figura 2.1. Principio de operación del DVR.....	22
Figura 2.2. Topología 1 para unidad de almacenamiento.	24
Figura 2.3. Topología 2 para unidad de almacenamiento.	25
Figura 2.4. Topología 3 para unidad de almacenamiento.	26
Figura 2.5. Topología 4 para unidad de almacenamiento.	27
Figura 2.6. Diagrama esquemático de un convertidor en puente completo.....	29
Figura 2.7. Diagrama esquemático de un convertidor de tres ramas en puente completo.....	29
Figura 2.8. Diagrama esquemático de un convertidor trifásico de tres ramas con condensador repartido.	30
Figura 2.9. Diagrama esquemático de un convertidor trifásico de tres puentes completos.	31
Figura 2.10. DVR con filtro en el lado del convertidor.....	32
Figura 2.11. Circuito equivalente para DVR con filtro en el lado del convertidor.	32
Figura 2.12. DVR con filtro en el lado de la línea.	33
Figura 2.13. Circuito equivalente para DVR con filtro en el lado de la línea.	33
Figura 2.14. Esquema de compensación para el DVR por fase.....	35
Figura 2.15. Diagrama fasorial para compensación pre-falla.	36
Figura 2.16. Compensación en pre-fallas de huecos de tensión	37
Figura 2.17. Compensación en pre-fallas de elevaciones de tensión	38
Figura 2.18. Diagrama fasorial para compensación en fase.	39
Figura 2.19. Diagrama fasorial trifásico para compensación en fase.	40
Figura 2.20. Compensación en fase de huecos de tensión.....	41
Figura 2.21. Compensación en fase de elevaciones de tensión.	42
Figura 2.22. Diagrama fasorial para compensación con energía optimizada.	43
Figura 2.23. Compensación con energía optimizada de huecos de tensión.....	49
Figura 2.24. Compensación con energía optimizada para elevaciones de tensión.	51
Figura 2.25. Tensión por fase inyectada por el DVR para huecos de tensión trifásicos.	52
Figura 2.26. Tensión por fase inyectada por el DVR para elevaciones de tensión trifásicas.....	53
Figura 2.27. Potencia activa inyectada por el DVR para huecos de tensión.....	54
Figura 2.28. Potencia activa inyectada por el DVR para elevaciones de tensión.	55
Figura 2.29. Proceso de estimación usando el filtro de Kalman.....	57
Figura 2.30. Cálculo de la señal de referencia monofásica.....	60
Figura 2.31. Transformación abc a α - β -0.....	61
Figura 2.32. Sistema de referencia trifásico y DQ0.....	62
Figura 2.33. Calculo de la señal de referencia para el DVR aplicando la transformación DQ0.	63
Figura 2.34. Estrategias de control para el convertidor DC/AC en el DVR.....	64
Figura 2.35. Control por banda de histéresis.....	65
Figura 2.36. Inversor monofásico en puente completo.....	66

Figura 2.37. Control de histéresis con $h=\pm 0,5V$.	66
Figura 2.38. Controlador PI aplicado al control de tensión en el DVR.	67
Figura 2.39. Modelo monofásico del DVR con filtro RLC.	68
Figura 2.40. Circuito equivalente del DVR con filtro RLC.	69
Figura 2.41. Controlador predictivo Deadbeat aplicado al control de tensión en el DVR.	71
Figura 3. 1. Diagrama de flujo para selección de parámetros del filtro RLC.	74
Figura 3.2. Corriente del convertidor para diferentes valores de C_f y n .	75
Figura 3.3. Diagrama de Bode para filtro RLC seleccionado.	75
Figura 3.4. Respuesta al escalón unitario filtro RLC.	76
Figura 3.5. Circuito equivalente para la barra de continua.	79
Figura 3.6. Modelo monofásico para simulación DVR.	80
Figura 3.7. Modelo trifásico para simulación DVR.	81
Figura 3.8. Diagrama de origen de perturbaciones en el sistema.	82
Figura 3.9. Características de huecos y elevaciones de tensión.	82
Figura 4.1. Estimación de parámetros de la onda de tensión de alimentación.	84
Figura 4.2. Diagrama unifilar por fase a simular.	85
Figura 4.3. Resultados de simulación monofásica perturbación 1.	86
Figura 4.4. Resultados de simulación monofásica perturbación 2.	87
Figura 4.5. Resultados de simulación monofásica perturbación 3.	88
Figura 4.6. Resultados de simulación monofásica perturbación 4.	89
Figura 4.7. Resultados de simulación monofásica perturbación 5.	90
Figura 4.8. Resultados de simulación monofásica perturbación 6.	91
Figura 4.9. Resultados de simulación monofásica perturbación 7.	92
Figura 4.10. Resultados de simulación monofásica perturbación 8.	93
Figura 4.11. Resultados de simulación monofásica perturbación 9.	94
Figura 4.12. Resultados de simulación monofásica perturbación 10.	96
Figura 4.13. Resultados de simulación monofásica perturbación 11.	97
Figura 4.14. Resultados de simulación monofásica perturbación 12.	98
Figura 4.15. Resultados de simulación monofásica perturbación 13.	99
Figura 4.16. Resultados de simulación monofásica perturbación 14.	100
Figura 4.17. Resultados de simulación monofásica perturbación 15.	101
Figura 4.18. Resultados de simulación monofásica perturbación 16.	104
Figura 4.19. Transformada DQ0 ante una perturbación.	105
Figura 4.20. Resultados de simulación trifásica perturbación 1.	107
Figura 4.21. Resultados de simulación trifásica perturbación 2.	109
Figura 4.22. Resultados de simulación trifásica perturbación 3.	111
Figura 4.23. Resultados de simulación trifásica perturbación 4.	114
Figura 4.24. Resultados de simulación trifásica perturbación 5.	116
Figura 4.25. Resultados de simulación trifásica perturbación 6.	118
Figura 4.26. Resultados de simulación trifásica perturbación 7.	121
Figura 4.27. Resultados de simulación trifásica perturbación 8.	124

RESUMEN

TÍTULO:

RESTAURADOR DINÁMICO DE TENSIÓN (DVR): ANÁLISIS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL¹.

AUTORES: CHRISTIAN ALEXANDER ARDILA RÍOS²
ALDER RAÚL SALAMANCA RAMÍREZ²

PALABRAS CLAVES: Calidad de la energía, perturbaciones de la onda de tensión, DVR, filtro de Kalman, deadbeat, energía optimizada.

DESCRIPCIÓN:

Debido a la necesidad creciente de los usuarios por recibir un óptimo servicio en el suministro de energía eléctrica se han desarrollado nuevos dispositivos de compensación con el fin de garantizar una prestación del servicio más eficiente y eficaz en cuanto a calidad de la energía se refiere.

Dentro de estos nuevos dispositivos se destaca el Restaurador dinámico de tensión (DVR, *Dynamic Voltage Restorer*) que mediante inyección directa de tensión en serie entre la fuente de alimentación y la carga a proteger permite compensar algunas de las perturbaciones que afectan la onda de tensión en sistemas de distribución.

En este documento se realiza una revisión del DVR como dispositivo de compensación de algunas perturbaciones presentes en el sistema de alimentación como huecos/elevaciones de tensión, componentes armónicas y desequilibrios de tensión. Esta revisión incluye un análisis de algunas de las topologías del DVR (unidad de almacenamiento de energía, convertidor DC/AC y filtro pasivo), criterios básicos a tener en cuenta en el diseño y selección del transformador de acoplamiento, técnicas de control en el convertidor (histéresis, PI y deadbeat), cálculo de las señales de referencia (a través del filtro de Kalman y la transformación DQ0) y estrategias de compensación para el control de la barra de continua (compensación en pre-falla, en fase o energía optimizada). Además se selecciona dos modelos para simulación del DVR, uno monofásico y otro trifásico, especificando cada una de sus componentes, con el objetivo de realizar simulaciones en el software ATP-DRAW que permitan verificar el funcionamiento del DVR y sus opciones de compensación.

¹Proyecto de grado

²Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director PhD. Johann Farith Petit Suárez. Codirector Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos.

SUMMARY

TITLE:

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR): ANALYSIS AND CONTROL ESTRATEGIES³.

AUTHORS: CHRISTIAN ALEXANDER ARDILA RÍOS⁴
ALDER RAÚL SALAMANCA RAMÍREZ⁴

KEYWORDS: Power quality, voltage disturbances, DVR, Kalman filter, deadbeat, optimized energy.

DESCRIPTION:

Due to the increasing necessity from users to get an excellent power supply service, new compensation devices have been developed to offer a more efficient service in terms of power quality concerns.

We can find the DVR (Dynamic Voltage Restorer) among these new compensation devices. It compensates some of the disturbances that affect the voltage wave in distribution systems by means of direct injection voltage between the power source and the sensitive load.

This paper presents a revision of the DVR literature as a compensation device of some disturbances present in the power source such voltage sag/swell, harmonic components and voltage imbalance. This revision includes an analysis of some DVR topologies (energy storage unit, DC/AC converter, and passive filter), basic criteria for design and selection of the coupling transformer, converter control techniques (Hysteresis control, PI control and deadbeat predictive control), references signals calculation (linear Kalman filter and DQ0 transformation), compensation strategies for DC-link control (pre-failure compensation, in-phase compensation and optimized energy compensation). Also, two models for DVR simulation are chosen, a one-phase and three-phase, and their components specifications. All this with the aim of creating simulations in the ATP-DRAW software that allow checking DVR performance and its compensation possibilities.

³Degree project

⁴Physics Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Advisor PhD. Johann Farith Petit Suárez. Subdirector Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos.

1. Introducción

Con el desarrollo y uso generalizado de equipos electrónicos que pueden provocar perturbaciones electromagnéticas, o que pueden ser sensibles y menos tolerantes a estos fenómenos, ha aumentado el interés por la calidad de la energía eléctrica en los últimos años [1].

Este interés se ve reforzado debido a que cualquier interrupción o perturbación puede causar inconvenientes, desde daños en electrodomésticos residenciales, hasta interrupción de procesos. Esto último conlleva a graves pérdidas económicas para las empresas [2].

El término *calidad de la energía eléctrica* se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante y lugar específico en el sistema eléctrico. Estos fenómenos se clasifican según la NTC 5000-02 y el estándar IEEE Std 1159-2009 en: Transitorios electromagnéticos, variaciones de corta duración del valor eficaz (rms), variaciones de larga duración del valor eficaz, desbalances, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia [1].

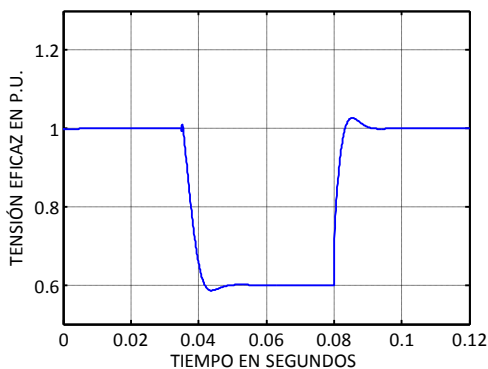
Los fenómenos de estudio para este proyecto de grado se relacionan directamente con la onda de tensión y sus variables, por tal razón se presenta a continuación una breve descripción de cada uno de estos fenómenos.

1.1. Perturbaciones de la onda de tensión

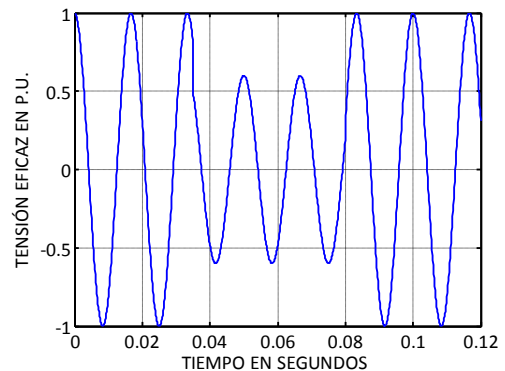
1.1.1. Huecos y elevaciones de tensión

Según el estándar IEEE Std, 1159-2009, los huecos y las elevaciones de tensión son una variación de corta duración del valor eficaz de la tensión nominal durante un tiempo superior a 0.5 ciclos de la frecuencia industrial pero menor o igual a 1 minuto. Para los huecos de tensión la variación del valor eficaz oscila entre 0,1 y 0,9 en p.u del valor nominal y para elevaciones de tensión entre 1,1 y 1,8 en p.u de la tensión nominal [1].

En las figuras 1.1 y 1.2 se puede observar la variación del valor eficaz y la forma de onda típica de una señal de tensión que experimenta un hueco y una elevación de tensión respectivamente.

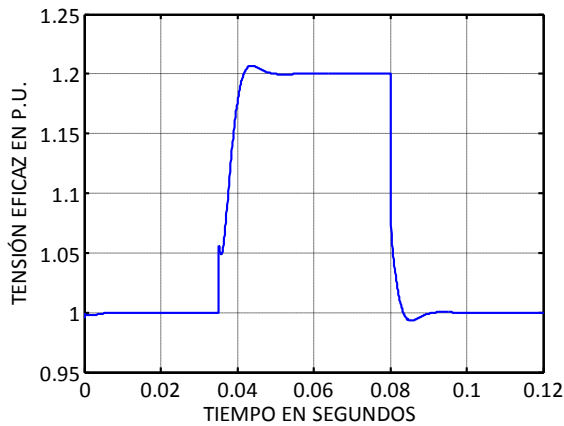


a) Valores RMS de un hueco de tensión.

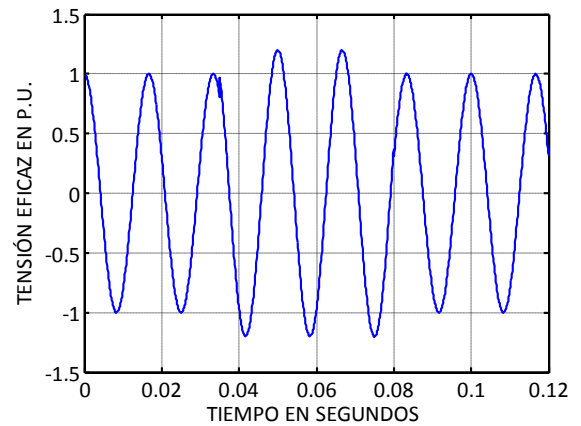


b) Forma de onda de un hueco de tensión.

Figura 1.1 Hueco de tensión.



a) Valores RMS de una elevación de tensión.



b) Forma de onda de una elevación de tensión.

Figura 1.2 Elevación de tensión

1.1.2. Armónicos.

Los armónicos en tensión son señales sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia con la que está diseñado el sistema de alimentación. A esta frecuencia de diseño se le denomina *frecuencia fundamental*. La superposición de ondas armónicas de tensión produce una distorsión de la onda de tensión, es decir, diferente a la sinusoidal.

Por ejemplo la forma de onda de la Figura 1.3 es el resultado de la suma de una señal de frecuencia fundamental a 60 Hz y el quinto armónico cuya amplitud está definida como el 0,2 en p.u del fundamental.

La distorsión armónica existe debido a las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de alimentación [1].

Los niveles de distorsión armónica pueden ser caracterizados por el espectro armónico en magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual como se indica en la figura 1.4. También es común el uso de la Distorsión Armónica Total o (THD por sus siglas en ingles *Total Harmonic Distortion*) como una medida de la magnitud de la distorsión armónica.

Esta distorsión armónica se puede calcular a partir de la siguiente ecuación [3]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Donde V_i , V_1 , corresponde a la magnitud de la componente armónica i -ésima de la tensión y la magnitud de la componente fundamental de la tensión respectivamente.

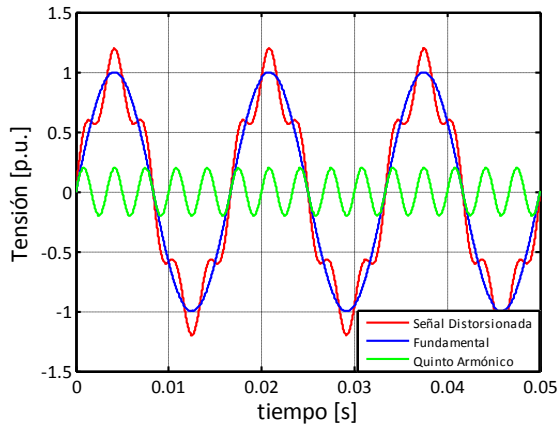


Figura 1.3. Componentes armónicas en una señal de tensión.

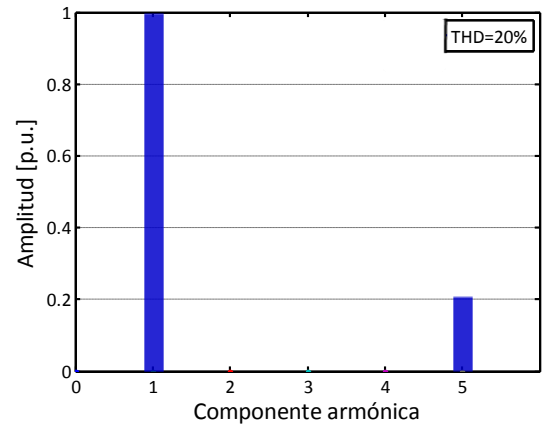


Figura 1.4. Magnitud del espectro armónico de la señal de tensión.

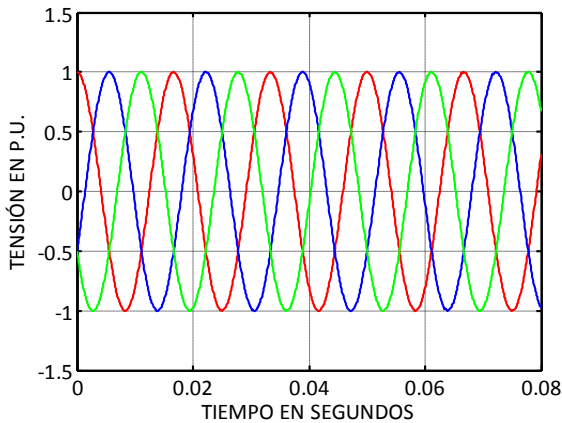
1.1.3. Desequilibrios de tensión

El desequilibrio de tensión es definido como la relación de la componente de secuencia negativa con respecto a la componente de secuencia positiva en un sistema trifásico, expresada en forma porcentual. Por lo general, el desequilibrio de tensión trifásico debe ser inferior al 3% [2], sin embargo los desequilibrios en la actualidad puede ser considerablemente mayores, especialmente cuando en sistemas trifásicos son conectadas cargas monofásicas que producen corrientes desequilibradas en el sistema, las que a su vez generan diferentes caídas de tensión en los alimentadores y por tanto desequilibrios de tensión [3]. Matemáticamente, el desequilibrio de tensión esta representado por la ecuación (1.2) [1], [3]:

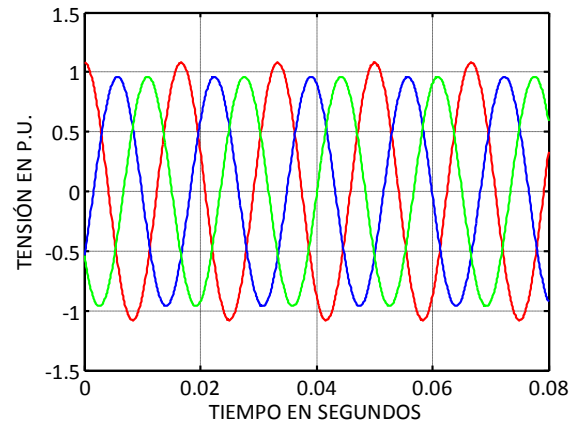
$$\%Desequilibrio = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Los desequilibrios pueden ser estimados a partir de diferentes ecuaciones, como las definidas en, IEEE 1159 [1], IEC 61000 [4], Gost 13109 [5] y ANSI C84.1 [6].

Un gráfico representativo de un desequilibrio de tensión puede observarse en las figuras 1.5.a y 1.5.b, en donde se muestra la diferencia entre un sistema trifásico balanceado y un sistemas con un desequilibrio del 8% calculado a partir de la ecuación (1.2).



a) Sistema trifásico de tensiones balanceadas.



b) Sistema trifásico de tensiones desequilibradas.

Figura 1.5. Desequilibrios de tensión.

1.2. Dispositivos de compensación

Con el fin de atenuar los fenómenos electromagnéticos que se presentan en los sistemas de alimentación se han desarrollado diversas soluciones que permiten mantener altos niveles en cuanto a calidad de la energía se refiere.

Dentro de estas soluciones se encuentran los dispositivos *Custom Power*, cuya base son conceptos en electrónica de potencia y su aplicación se da principalmente en sistemas de distribución. Existe una gran variedad de dispositivos *Custom Power*, estos son conectados ya sea en paralelo, en serie o una combinación de ambos [7].

Los controladores de electrónica de potencia que son usados en las soluciones de *Custom Power* pueden ser de tipo de reconfiguración de red o tipo compensación. Los dispositivos de reconfiguración de red son usualmente llamados *switchgear* y estos incluyen limitadores de corriente, interruptores de corriente y dispositivos de transferencia de corriente. Las versiones de estado sólido o estáticas son conocidas como [7]:

- Limitadores de corriente de estado sólido (SSCL por sus siglas en inglés *Solid state current limiter*).
- Interruptor de estado sólido (SSB por sus siglas en inglés *Solid state breaker*).
- Interruptor de transferencia de estado sólido (SSTS por sus siglas en inglés *Solid state transfer switch*).

Los dispositivos de compensación ya sean para compensar la carga, es decir, para corregir su factor de potencia, desbalance, etc. o para mejorar la calidad de la tensión de alimentación se pueden clasificar según su conexión en serie, paralelo o una combinación de ambos. Estos incluyen [7]:

- Compensador estático en distribución (DSTATCOM por su siglas en inglés *Distribution STATCOM*)
- Restaurador dinámico de tensión (DVR por sus siglas en inglés *Dynamic voltage restorer*)

-Acondicionador unificado de calidad de la energía (UPQC por sus siglas en inglés *Unified power quality conditioner*)

Dentro de los dispositivos de compensación se encuentra el DVR el cual es usado para proteger cargas sensibles de algunos fenómenos electromagnéticos, mediante la inyección directa de tensión en serie entre la fuente de alimentación y la carga.

El DVR puede ser modelado idealmente como una fuente controlada de tensión [7]. Físicamente consta de cuatro unidades fundamentales como lo son: unidad de almacenamiento de energía, convertidor DC/AC, filtro pasivo de corriente alterna y transformador de acoplamiento ver Figura 1.6 [8].

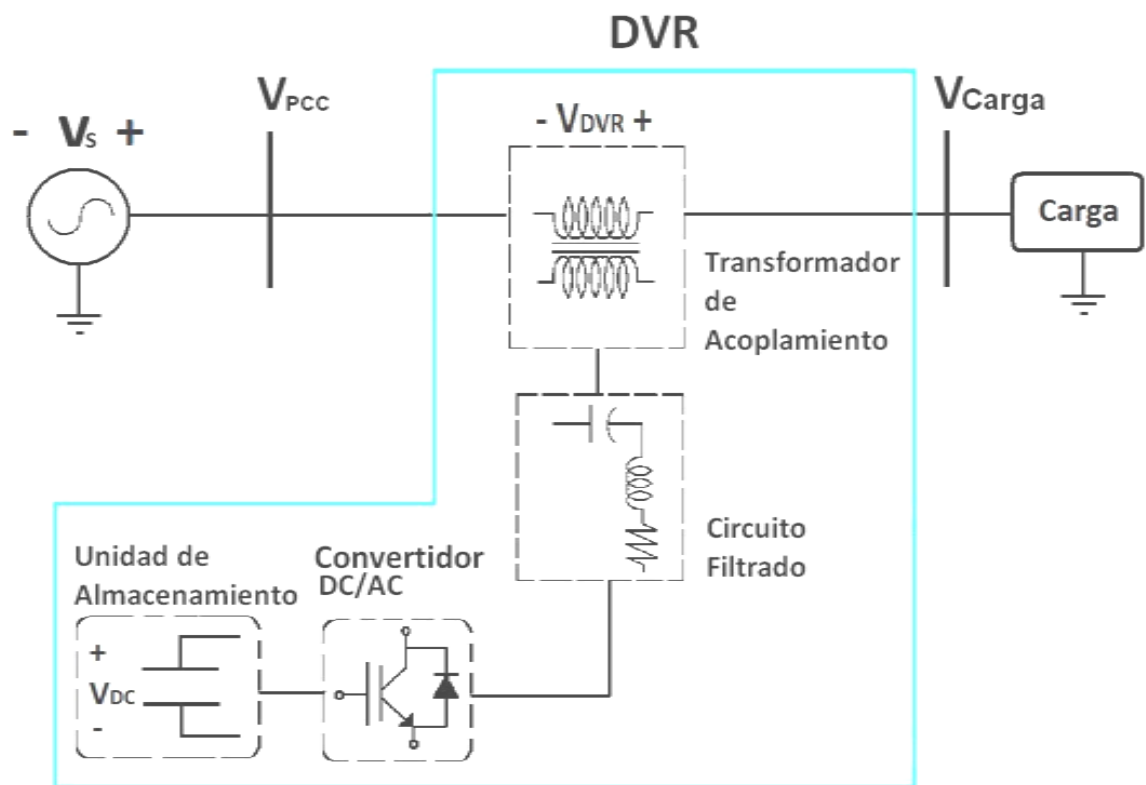


Figura 1.6. Topología típica del DVR (representación por fase).

El principio de funcionamiento del DVR así como sus topologías, componentes, estrategias de control y demás características se presentan en los capítulos siguientes.

1.3. Organización del documento

En este capítulo se ha expuesto el concepto de calidad de la energía y algunas definiciones de los fenómenos electromagnéticos que afectan la onda de tensión, así como los dispositivos utilizados frecuentemente en la mitigación del mismo en sistemas de distribución. En el capítulo 2, se describe la estructura del restaurador dinámico de tensión, topologías y algunas de las estrategias

más utilizadas en el cálculo de las referencias, control del convertidor, estrategias de compensación y control de la barra de continua. En el capítulo 3, se seleccionan y especifican los modelos y las señales de fallas que se utilizarán en las simulaciones. Luego en el capítulo 4, se presentan y analizan en forma sistematizada los resultados obtenidos a partir de la simulación con el fin de verificar el funcionamiento del DVR y las opciones de compensación. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, observaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. Restaurador Dinámico de Tensión (DVR)

En la actualidad la academia y la industria han propuesto diversas formas para mejorar la calidad de la energía, siendo el DVR una de las alternativas más eficaces para contrarrestar las perturbaciones que afectan la onda de tensión [9].

Desde las primeras aplicaciones del DVR en 1996 en una subestación de 12,47 kV en Anderson sur de Carolina y en febrero de 1997 en un sistema de distribución a 22 kV en Stanhope, Victoria, Australia, el DVR ha demostrado un buen rendimiento de compensación. Su impacto se ha estimado como un ahorro cercano a los 100 000 dólares anuales en los sistemas donde se ha implementado [10]. Algunas de las instalaciones del DVR pueden consultarse en [11].

El desarrollo del DVR en los últimos años ha sido el resultado de investigaciones y diferentes propuestas sobre topologías [12], implementación de nuevas tecnologías en componentes [13], [14], [15], y en estrategias de control [16], [17], todo esto con el fin de brindar al DVR mejor desempeño y nuevas opciones de compensación.

2.1. Principio de operación

La función básica del DVR es la inyección en forma dinámica de una tensión controlada V_{DVR} en serie con la tensión de alimentación V_{PCC} en el punto de acople común PCC (por sus siglas en inglés "Point of Common Coupling") por medio de un transformador de acoplamiento. El valor de la tensión instantánea es controlado para mitigar algunas perturbaciones que se puedan producir en la tensión de la carga debido a perturbaciones en la tensión de alimentación. Esto significa que cualquier diferencia de tensión con respecto a la tensión de servicio ideal, causada por perturbaciones en el alimentador de AC, debe ser compensada por una tensión equivalente generada por el convertidor e inyectada a la red eléctrica a través del transformador (ver Figura 2.1) [18].

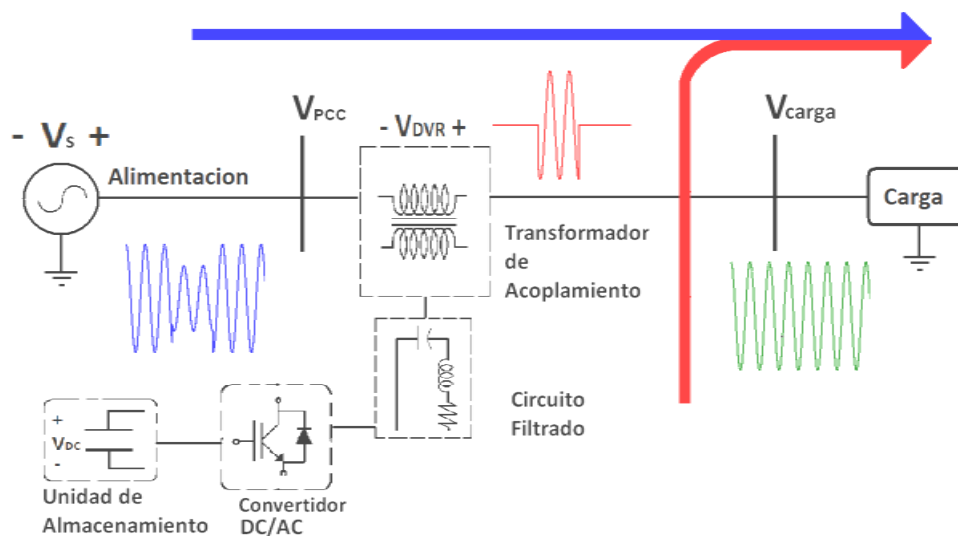


Figura 2.1. Principio de operación del DVR.

Dentro de las opciones de compensación para las cuales se diseñó inicialmente el DVR se encuentra los huecos y elevaciones de tensión, sin embargo propuestas e investigaciones posteriores han permitido ampliar sus opciones a armónicos y desequilibrios de tensión entre otras. Para que el DVR pueda compensar estas perturbaciones de tensión, debe ser capaz de generar y/o absorber potencia activa y/o reactiva hacia o desde el sistema de alimentación [19], [20], según el tipo de perturbaciones que se quiera compensar.

El intercambio de potencias que se realiza entre DVR y el sistema, dependerán tanto de la topología como de las estrategias de control implementadas [21], como se analizará en las siguientes secciones.

2.2. Topologías

En esta sección se presentan las diferentes topologías para el DVR las cuales se clasifican principalmente de acuerdo a la unidad de almacenamiento, tipo de convertidor y el filtro [22].

2.2.1. Unidad de almacenamiento de energía

El objetivo principal de la unidad de almacenamiento es proporcionar la energía necesaria para generar las tensiones de referencia a través de una barra de continua e inyectar la potencia necesaria cuando se requiera [23-25].

Los principales dispositivos de almacenamiento de energía utilizados en el DVR son baterías, condensadores y superconductores magnéticos de almacenamiento de energía (SMES, por sus siglas en inglés *Superconductive Magnetic Energy Storage*) [12], [24], [25].

Entre los dispositivos anteriormente nombrados las baterías son comúnmente las más utilizadas, debido a su alta efectividad [23-25]. Estas pueden ser conectadas directamente a la barra de continua o a través de un regulador de tensión. Sin embargo, las baterías generalmente tienen una vida útil corta y requieren un sistema de control que puede resultar muy costoso [23].

Una alternativa interesante a las baterías es el uso de supercondensadores, los cuales tienen rangos de tensiones más amplios y pueden ser conectados directamente a la barra de continua. Los supercapacitores tienen una densidad específica de energía menor que una batería, pero una potencia específica mayor, lo cual los hace ideales para cortos pulsos de potencia [23], [26], [27].

Algunos supercondensadores pueden mantener su carga sobre períodos extendidos de tiempo, a fin de actuar como una batería. Sin embargo, a diferencia de las baterías, los supercondensadores tienen un tiempo corto de carga y una vida útil mayor. Por otra parte, los supercondensadores deben tener un controlador de carga-descarga y un circuito de conmutación serie-paralelo para usar la energía almacenada efectivamente con la aplicación de diversas estrategias de compensación para una operación óptima, con el fin de efectuar una compensación dinámica de tensión [18], [23].

Las posibles configuraciones que puede presentar el DVR de acuerdo a la unidad de almacenamiento de energía se explican brevemente a continuación.

Topologías del DVR con energía tomada de la barra de continua

Las topologías del DVR con energía almacenada son necesarias para cierto tipo de perturbaciones como huecos de tensión presentes en el sistema de alimentación que sobrepasen el 40% de la tensión nominal en la carga [20], [21], [28].

a. Tensión de la barra de continua no controlada

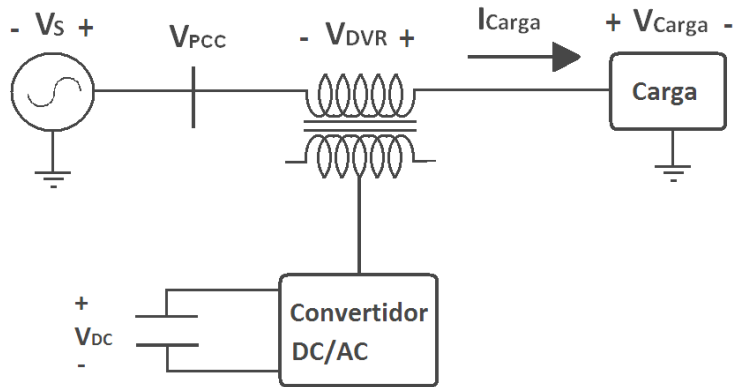


Figura 2.2. Topología 1 para unidad de almacenamiento.

En esta topología (ver Figura 2.2) se utilizan condensadores como almacenadores de energía, que en general son una solución apropiada para el DVR. Además esta topología tiene una configuración de convertidor DC/AC relativamente simple y la energía almacenada en la barra continua puede ser recargada por un convertidor auxiliar de baja potencia cuando la red está en operación normal. Sin embargo, la energía almacenada es difícil de utilizar eficientemente y durante huecos de tensión severos gran parte de la energía almacenada no puede ser usada porque el convertidor rápidamente entra en sobremodulación en un esfuerzo por inyectar la tensión más alta que sea posible [20], [21], [28].

La energía almacenada en la barra de continua se expresa como:

$$E_{almacenada} = \frac{1}{2} \cdot C_{DC} \cdot V_{DC_nominal}^2 \quad (2.1)$$

Donde C_{DC} y $V_{DC_nominal}$ representan el valor de la capacitancia del condensador y la tensión nominal en la barra de continua respectivamente. Esta última se puede seleccionar de acuerdo al criterio descrito en [29].

Durante la compensación la tensión en la barra de continua decae exponencialmente, reduciendo de esta forma la capacidad para compensar perturbaciones severas o de larga duración. Por tanto la energía entregada por el DVR está dado por:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C_{DC} \cdot (V_{DC_nominal}^2 - V_{DC_minima}^2) \quad (2.2)$$

El valor de V_{DC_minima} corresponde a la mínima tensión permitida en la barra de continua para la cual la controlabilidad del DVR no se vea afectada.

b. Tensión de en la barra de continua controlada

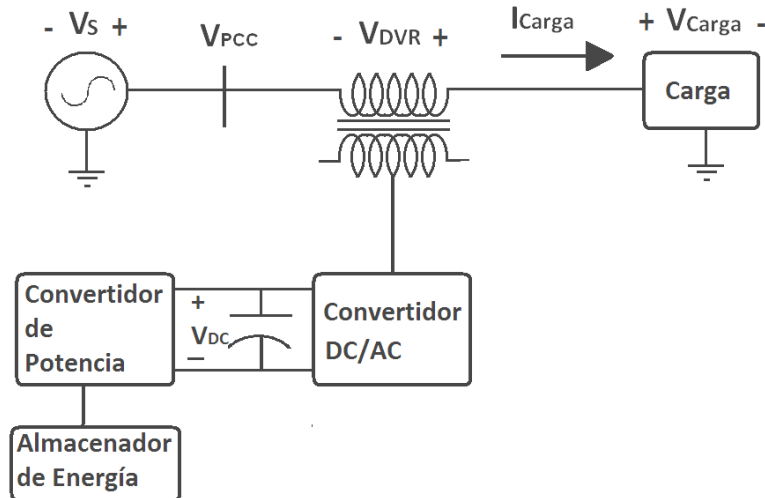


Figura 2.3. Topología 2 para unidad de almacenamiento.

En esta topología (ver Figura 2.3) la energía almacenada puede ser usada en el DVR mediante un convertidor DC/DC de alta potencia externo al sistema. La energía almacenada se transfiere de un gran almacenador a un pequeño almacenador en la barra continua utilizando el convertidor de alta potencia durante la perturbación de tensión. Por tanto, la tensión en la barra de continua se mantiene constante [20], [21], [28].

El desempeño de este sistema es mejor comparado con la topología 1, pero el costo de los equipos es mayor debido a la necesidad de un almacenador de energía y un convertidor de alta potencia DC/DC.

Topologías del DVR con energía tomada de la red

Las topologías del DVR sin energía almacenada funcionan considerando que una parte significativa de la tensión de alimentación permanece durante el hueco de tensión, y que esta tensión puede ser usada para proporcionar el aumento de energía requerido para mantener la potencia total de la carga a la tensión nominal. Sin embargo, estas topologías tienen la desventaja de tomar más corriente de la línea durante la falla y por tanto las cargas conectadas aguas arriba pueden ver una caída de tensión más grande. Por otra parte, se obtiene un ahorro en el sistema de almacenamiento de energía y existe la capacidad de compensar perturbaciones de mayor duración [20], [21]. En particular, cuando el DVR es conectado a una red robusta, la potencia necesaria para abastecer la carga puede ser obtenida por el aumento de la corriente de

alimentación que es transferida al convertidor paralelo e inyectando una tensión de compensación a través del convertidor DC/AC [20].

Dos topologías básicas pueden ser usadas, las cuales son clasificadas de acuerdo a la ubicación del convertidor paralelo.

a. Convertidor paralelo conectado en el lado de la red de alimentación

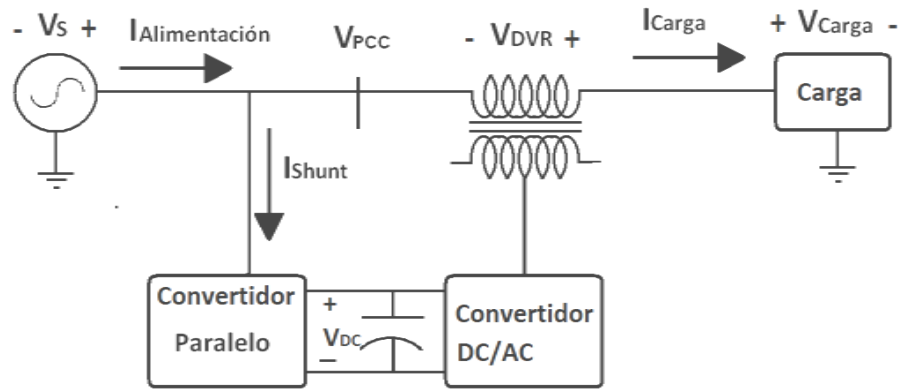


Figura 2.4. Topología 3 para unidad de almacenamiento.

En la topología mostrada en la Figura 2.4, la tensión en la barra de continua es no controlada y el convertidor paralelo carga el condensador en DC al valor de tensión actual del sistema de alimentación. Durante huecos/elevación la tensión en la barra de continua cae o aumenta proporcionalmente a la perturbación [20], [21], [28]. Por tanto:

$$V_{DC} \approx (1 - \varepsilon) \cdot V_{carga} \tag{2.3}$$

Donde ε se define como el factor de reducción o aumento de la tensión eficaz de alimentación expresado como:

$$\varepsilon = \frac{V_{carga} - V_S}{V_{carga}} \tag{2.4}$$

Siendo V_{carga} la tensión nominal fase-neutro de la carga y V_S la tensión de alimentación fase-neutro durante la falla.

En esta topología la capacidad de compensación para huecos de tensión se define como:

$$V_{comp} = \varepsilon \cdot V_{carga} \tag{2.5}$$

Por tanto la siguiente desigualdad se debe cumplir:

$$V_{comp} \leq V_{DC} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon \cdot V_{carga} \leq V_{carga} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.7)$$

Despejando ε se obtiene:

$$\varepsilon \leq \frac{1}{2} \quad (2.8)$$

De la ecuación anterior se puede deducir que la caída de tensión máxima a compensar totalmente corresponderá a un 50% respecto a la nominal.

En esta topología la capacidad de compensación para elevaciones de tensión no está limitada, debido a que la tensión en la barra de continua aumenta durante la compensación.

b. Convertidor paralelo conectado en el lado de la carga

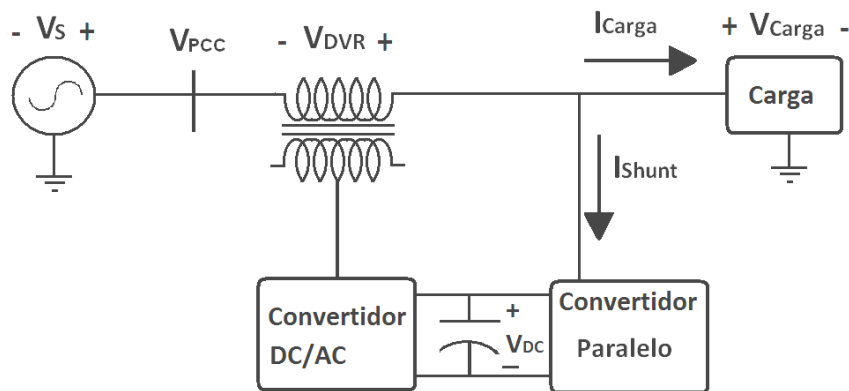


Figura 2.5. Topología 4 para unidad de almacenamiento.

Para la topología de la Figura 2.5, la tensión de entrada al convertidor paralelo es controlada dentro de los límites del convertidor DC/AC, y la tensión en la barra de continua se puede mantener constante mediante la inyección de una tensión suficiente V_{DVR} . Por tanto:

$$V_{DC} \approx V_{carga} \quad (2.9)$$

Esta topología tiene desventaja debido a las grandes corrientes que debe entregar el convertidor DC/AC, además la carga puede ser afectada por las corrientes no lineales producidas por el convertidor paralelo. Sin embargo, un DVR usando esta topología puede ser una solución eficiente en términos del diseño del convertidor paralelo debido a que la tensión de la barra de continua puede mantenerse constante [20], [21], [28].

2.2.2. Convertidor

Los convertidores de DC en AC conocidos como inversores, tienen como función cambiar una tensión de entrada en corriente continua a una tensión de salida en corriente alterna, con magnitud y frecuencia deseada. Asimismo, tanto la tensión de salida como la frecuencia pueden ser variables o fijas [30].

Para el convertidor es necesario tener en cuenta que su capacidad para seguir con exactitud la señal de referencia será dependiente de factores como el nivel de tensión en el almacenador de corriente continua, la frecuencia de conmutación, el filtro y la topología del convertidor.

Teniendo en cuenta estos factores, en esta sección se hablará sobre las topologías convencionales en convertidores de potencia monofásicos y trifásicos. Todas estas topologías pueden ser simuladas como combinaciones esquemáticos con interruptores ideales y fuentes ideales de tensión en DC.

En lo referente a la implementación, los dispositivos de conmutación utilizados en el convertidor son los *Gate Turn –Off thyristors* (GTO), *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors* (MOSFET), *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBT) e *Integrated Gate Commutated Thyristors* (IGCT), siendo el IGBT el más usado porque combina rápidos tiempos de conmutación con una alta capacidad de soporte de tensión [12], [14]. El IGCT es un dispositivo compacto reciente con mejoras en rendimiento y confiabilidad que permite construir convertidores de muy altas potencias. Debido al sofisticado diseño de convertidores con IGCTs, el DVR puede compensar perturbaciones de tensión con una capacidad mayor que los DVRs con dispositivos de conmutación convencionales [15].

En la Tabla 2.1 se pueden observar las características de conmutación y tensiones admisibles para los diferentes dispositivos de conmutación [7].

<i>Dispositivo</i>	<i>Tensión nominal máxima</i>	<i>Velocidad de conmutación</i>
MOSFET	1000 V	50 ns
IGBT	3300 V	0,5 μ s
GTO	8000 V	5 μ s

Tabla 2.1. Capacidad de tensión y velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia.

Convertidor monofásico

La Figura 2.6 ilustra un convertidor en puente completo, este tipo de convertidor está formado por cuatro interruptores $s_1 - s_4$ cada uno compuesto por un dispositivo semiconductor de potencia y un diodo en anti-paralelo como también se indica en la figura [7].

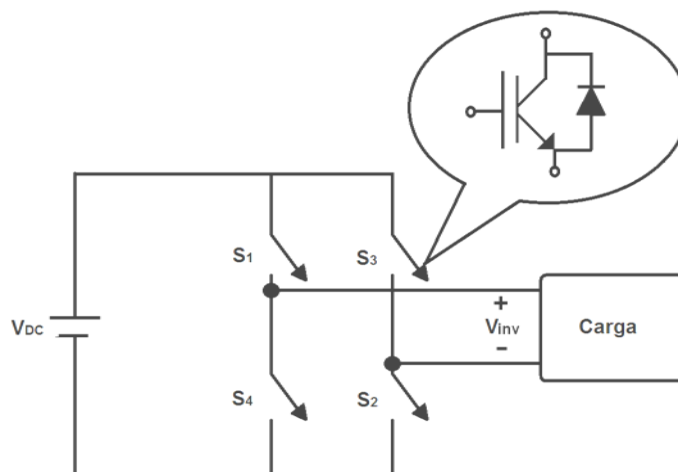


Figura 2.6. Diagrama esquemático de un convertidor en puente completo.

Los interruptores de cada rama son complementarios, es decir mientras s_1 permanece cerrado, s_4 se mantiene abierto y viceversa. La carga se conecta a la salida del inversor con una tensión V_s , la cual es alimentada por una fuente de corriente continua, con una tensión V_{DC} . Cuando los transistores s_1 y s_2 se activan simultáneamente, la tensión de salida es V_{DC} . Si los transistores s_3 y s_4 se activan simultáneamente, la tensión a través de la carga se invierte, y adquiere el valor de $-V_{DC}$.

Convertidores trifásicos

El convertidor mostrado en la Figura 2.7 recibe el nombre de convertidor de tres ramas en puente completo (TLFB por sus siglas en inglés *Three-Leg Full-Bridge*). Para el TLFB resulta imposible la inyección de tensiones de secuencia cero a la red [31].

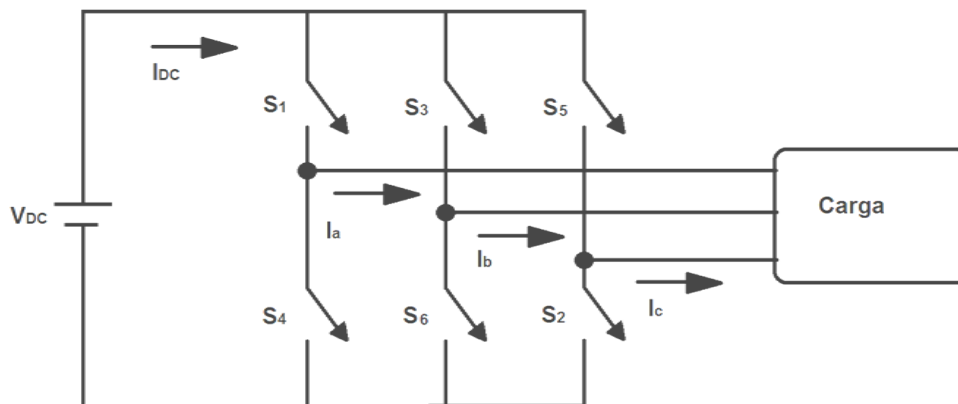


Figura 2.7. Diagrama esquemático de un convertidor de tres ramas en puente completo.

En sistemas trifásicos de cuatro hilos es posible que se presentes desequilibrios de tensión. En estos casos, se hacen necesario la utilización de otras topologías que permitan la inyección de tensiones de secuencia cero a la red. La solución más simple consiste en la utilización de un

inversor de tres ramas con condensador repartido (TLSC por sus siglas en ingles *Three-Leg Split-Capacitor*), como se puede ver en la Figura 2.8 [31].

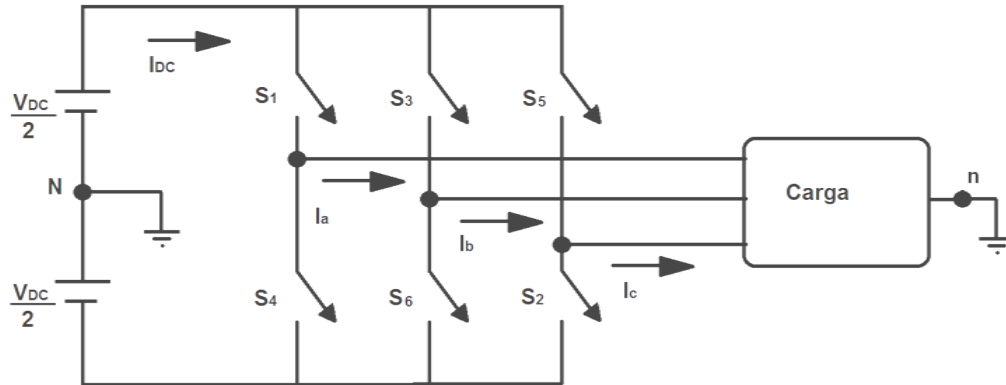


Figura 2.8. Diagrama esquemático de un convertidor trifásico de tres ramas con condensador repartido.

El TLSC está compuesto de seis interruptores, dos por cada rama, los cuales son complementarios. Este inversor es alimentado por medio de dos fuentes de tensión en corriente continua cada una con una tensión igual a $V_{DC}/2$, donde el punto neutro del alimentador es denotado por N y la carga trifásica es conectada a la salida del inversor donde el neutro de la carga es denotado por n [31].

En el inversor TLSC, al estar conectado el neutro de la carga con el punto intermedio de la barra de continua, las tres ramas del mismo trabajan de manera independiente, es decir, la tensión de salida de cada rama depende únicamente del estado de conmutación de sus dos interruptores. Sin embargo esta topología presenta las siguientes limitantes [31].

La primera de ellas se da al sintetizar una tensión de salida únicamente de secuencia positiva y negativa, ya que el convertidor no aprovecha completamente la tensión de la barra de continua, al no existir un potencial de flotación entre el punto medio de la barra de continua y el neutro de la carga. Otra de las limitaciones de esta topología consiste en que, en un momento dado, la máxima amplitud de la tensión de secuencia cero generable es dependiente de la amplitud de las tensiones de secuencia positiva y negativa al tener que ser sintetizadas en un mismo instante por las tres únicas ramas [31].

Cuando el nivel de compensación en secuencia cero llega a ser considerable el inversor de tres puentes completos mostrado en la Figura 2.9 ofrece mejores características que el TLSC. En este convertidor se utilizan transformadores de acoplamiento a la red, para obtener tres convertidores monofásicos independientes, uno para cada fase, consiguiendo de esta forma una capacidad mayor de inyección de tensión [31].

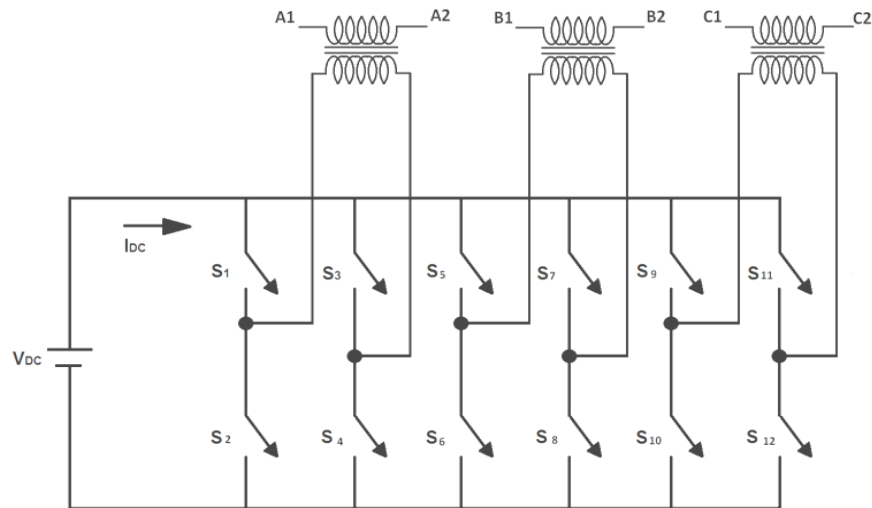


Figura 2.9. Diagrama esquemático de un convertidor trifásico de tres puentes completos.

La tensión máxima de salida de cada inversor monofásico coincide con el valor de la tensión de la barra de continua, por lo que dicha tensión puede ser considerablemente menor que en la topología anteriormente expuesta. Además, al utilizar esta topología, las técnicas de control para el cálculo de las señales de conmutación de los interruptores se aplican de forma independiente a cada fase, lo que permite la utilización de estrategias de modulación unipolar, consiguiendo tres niveles de tensión a la salida del mismo y permite reducir la frecuencia de conmutación de los interruptores disminuyendo el rizado en la tensión inyectada [31].

2.2.3. Filtro pasivo

La principal tarea del filtro pasivo es mantener el contenido de armónicos de tensión generados por el convertidor DC/AC dentro de los límites permisibles [17], [23]. El sistema de filtrado puede ser ubicado en lado de alta o baja tensión del transformador de acoplamiento y son referidos generalmente como filtro en el lado de la línea y filtro en el lado del inversor respectivamente [32].

El esquema de filtro en el lado del convertidor se muestra en la Figura 2.10. Este está compuesto de una bobina L_f , un condensador C_f y generalmente se suele agregar una resistencia R_f que representa las pérdidas en el inversor y la resistencia asociada a la bobina [33], [34]. Este sistema es preferido en lo concerniente a la capacidad de atenuación de armónicos, además evita que las corrientes armónicas de alto orden circulen por el transformador de acoplamiento [33]. Sin embargo cuando el DVR está en funcionamiento, la bobina de filtro L_f puede causar una caída de tensión y un desfase en la componente fundamental de salida del convertidor, lo cual puede comprometer el esquema de control del DVR [33], [34]. Este problema generalmente se resuelve diseñando el filtro con bobinas de baja inductancia.

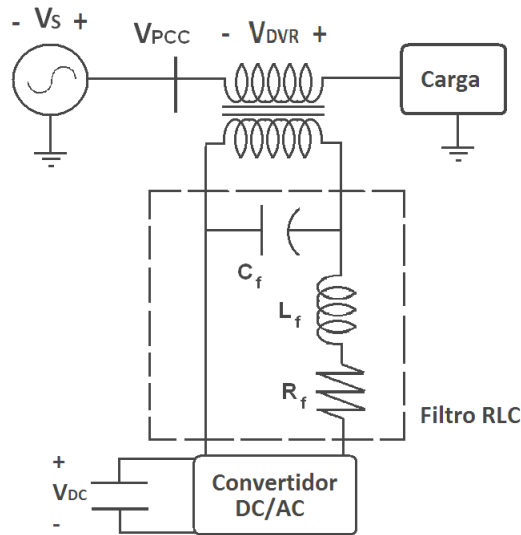


Figura 2.10. DVR con filtro en el lado del convertidor.

El circuito equivalente del sistema con el filtro en el lado del convertidor se muestra en la Figura 2.11, donde V_{inv} es la tensión generada por el convertidor. R_T y L_T representan la resistencia y la bobina del transformador referidos al lado de baja tensión. En este circuito se desprecia la rama de magnetización.

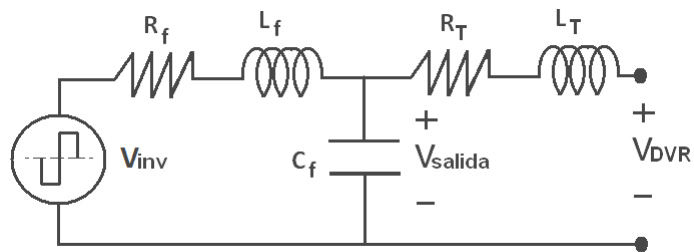


Figura 2.11. Circuito equivalente para DVR con filtro en el lado del convertidor.

El esquema del filtro en el lado de la línea se muestra en la Figura 2.12, este está compuesto principalmente de un condensador C_f y la impedancia equivalente del transformador referida al lado de alta puede actuar como parte del filtro, para formar un equivalente RLC serie al igual que el filtro en el lado del inversor [33], [34]. En este sistema las corrientes armónicas de alto orden generadas en el inversor circulan por el transformador de acoplamiento, por tanto la capacidad nominal del transformador debe incrementarse [34-36].

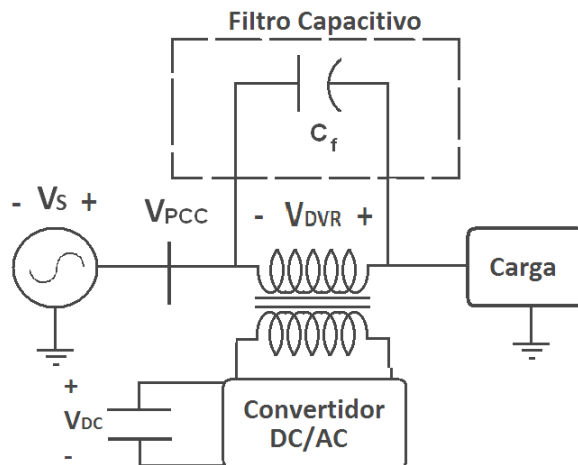


Figura 2.12. DVR con filtro en el lado de la línea.

EL sistema equivalente del filtro en el lado de línea sin tener en cuenta la rama de magnetización del transformador se muestra en la Figura 2.13.

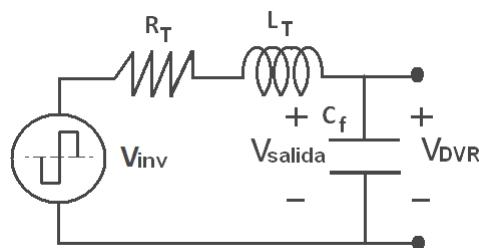


Figura 2.13. Circuito equivalente para DVR con filtro en el lado de la línea.

En el diseño del filtro se deben considerar factores como la atenuación total de armónicos generados por la conmutación, minimizar la capacidad nominal del convertidor causada por la introducción del filtro y en el caso del filtro en el lado del inversor minimizar la diferencia de magnitud de tensión y fase a la frecuencia fundamental entre las tensiones a ambos lados del filtro [33]. La función de transferencia para cualquiera de estas topologías corresponde a [37]:

$$H(s) = \frac{V_{salida}}{V_{inv}} = \frac{1}{s^2 \cdot L_f \cdot C_f + s \cdot R_f \cdot C_f + 1} \quad (2.10)$$

En el caso del filtro en el lado de la línea R_f corresponde a R_T y L_f a L_T .

En [33-36] se proponen métodos sistemáticos para el cálculo de cada una de las componentes del filtro teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente.

En [25] se realiza el diseño básico del filtro el cual se sintoniza a una frecuencia deseada, se selecciona un valor de condensador o bobina y el parámetro faltante se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (2.11)$$

Siendo ω la frecuencia de sintonización para el filtro.

2.2.4. Transformador de acoplamiento

El transformador de acoplamiento también conocido como transformador de inyección, no sólo tiene como función reducir la tensión requerida en la barra de continua, sino que también proporciona aislamiento entre el convertidor y la línea. Esto evita que el almacenador de corriente continua entre en cortocircuito a través de los interruptores de diferentes ramas del convertidor [14].

El diseño de este transformador es muy importante porque puede verse enfrentado a saturación, sobredimensionamiento, recalentamiento, elevados costos y bajo rendimiento [38]. La tensión a inyectar por el DVR puede consistir en componente fundamental, armónicos deseados, armónicos producidos por conmutación y componente en corriente continua. Si el transformador no está diseñado correctamente, la tensión inyectada puede saturar el transformador y ocasionar un funcionamiento incorrecto del DVR. En la literatura, este problema se resuelve con el sobredimensionamiento del transformador, sin embargo, esto aumenta el costo total y el tamaño del DVR [14].

El análisis presentado en [39] se centra en la relación entre el transformador de inyección y otros componentes que constituyen el DVR, además propone un método para la especificación de parámetros del transformador, que dan lugar a un análisis costo-eficiencia en el diseño del mismo.

Los siguientes aspectos deben tenerse en cuenta en el diseño del transformador de inyección para DVR [14]:

1. El DVR está permanentemente conectado en la línea, por tanto las pérdidas de potencia activa en el transformador deben ser mínimas.
2. La corriente de carga puede ser lineal o no lineal. Esta corriente fluye a través del transformador produciendo caídas de tensión no lineales en la bobina de dispersión. Por lo tanto, esta debe ser baja.
3. La frecuencia máxima de conmutación del inversor debe ser tomada en cuenta para que el transformador de manera satisfactoria reproduzca las tensiones pulsantes de alta frecuencia.

2.3. Estrategias de compensación para el control de la barra de continua

Las opciones de compensación del DVR dependen de diferentes factores entre los que se incluyen la capacidad de almacenamiento de energía, diferentes condiciones de carga, diferentes tipos de perturbaciones y de la estrategia de compensación utilizada [39,40].

Por otro lado la estrategia de compensación implementada depende principalmente de la característica de la carga debido a que existen cargas que no son tolerantes a cambios bruscos de fase [39-40].

Existen tres estrategias distintivas para la inyección de tensión del DVR, estas son, compensación en pre-falla, compensación en fase y compensación de avance de fase o de energía optimizada [20], [40-48].

Las variables a tener en cuenta en el análisis de las tres estrategias de compensación, se muestran en la Figura 2.14, donde V_s es la tensión de alimentación medida en el punto de acople común (PCC), V_{carga} la tensión en la carga, que se asume compensada con el DVR, es decir su magnitud se mantiene en el valor nominal y I_{carga} es la corriente nominal de la carga.

El subíndice pre en cada una de las variables indica las condiciones antes de la perturbación.

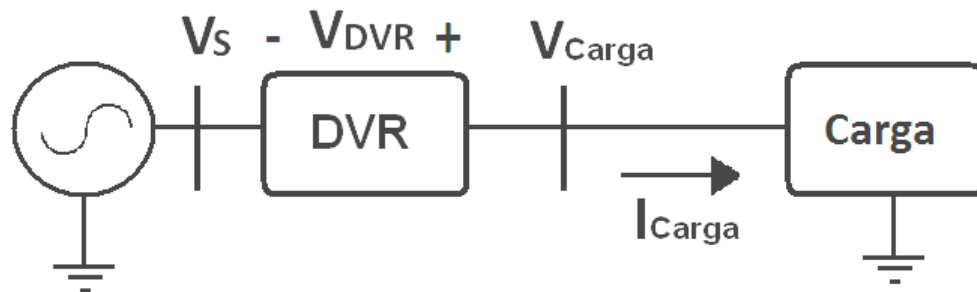


Figura 2.14. Esquema de compensación para el DVR por fase.

2.3.1. Compensación pre-falla

Este método consiste en seguir la tensión de alimentación continuamente y compensar la tensión en la carga durante la falla a las condiciones de pre-falla tanto en magnitud como en ángulo de fase [10], [40-41], por tanto dependiendo del salto de fase de la tensión de alimentación el DVR debe inyectar una tensión mayor de la necesaria para restablecer solo la magnitud de la tensión de pre-falla [40-41].

La Figura 2.15 muestra el diagrama fasorial por fase de la compensación pre-falla tanto para el caso de huecos como para elevaciones, donde V_s , V_{carga} , I_{carga} , φ , y δ representan la tensión de

alimentación durante la falla, la tensión de pre-falla en la carga, la corriente nominal de la carga, el factor de potencia de la carga y el salto de fase de la tensión de alimentación respectivamente.

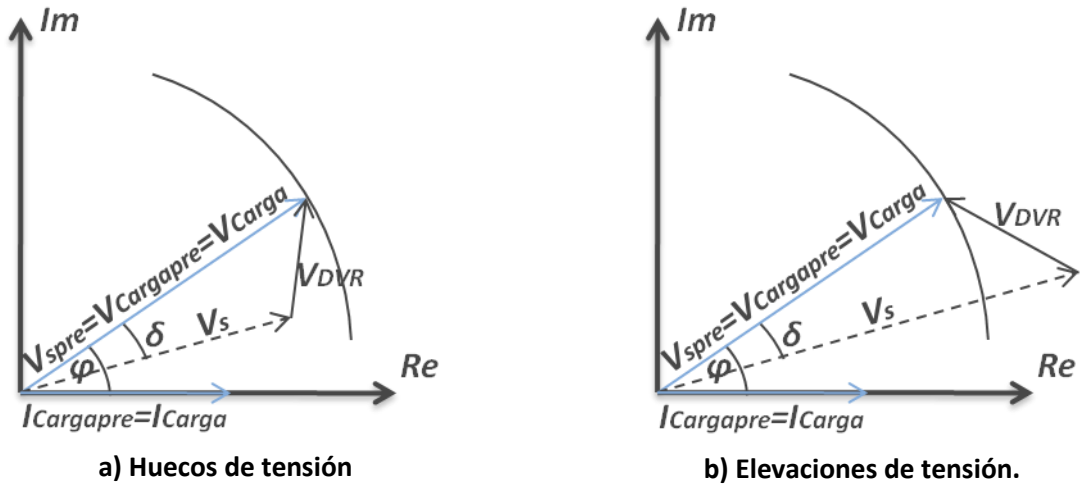


Figura 2.15. Diagrama fasorial para compensación pre-falla.

De acuerdo a los diagramas anteriores para el caso de compensación de huecos y elevaciones de tensión, la magnitud de la tensión por fase inyectada por el DVR se puede escribir como:

$$V_{DVRj} = \sqrt{V_{sj}^2 + V_{carga}^2 - 2 \cdot V_{sj} \cdot V_{carga} \cdot \cos(\delta_j)} \quad (2.12)$$

El subíndice j representa cada una de las fases del sistema.

La potencia activa inyectada por fase por el DVR es:

$$P_{DVRj} = V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot (\cos(\varphi) - (1 - \varepsilon) \cdot \cos(\varphi - \delta_j)) \quad (2.13)$$

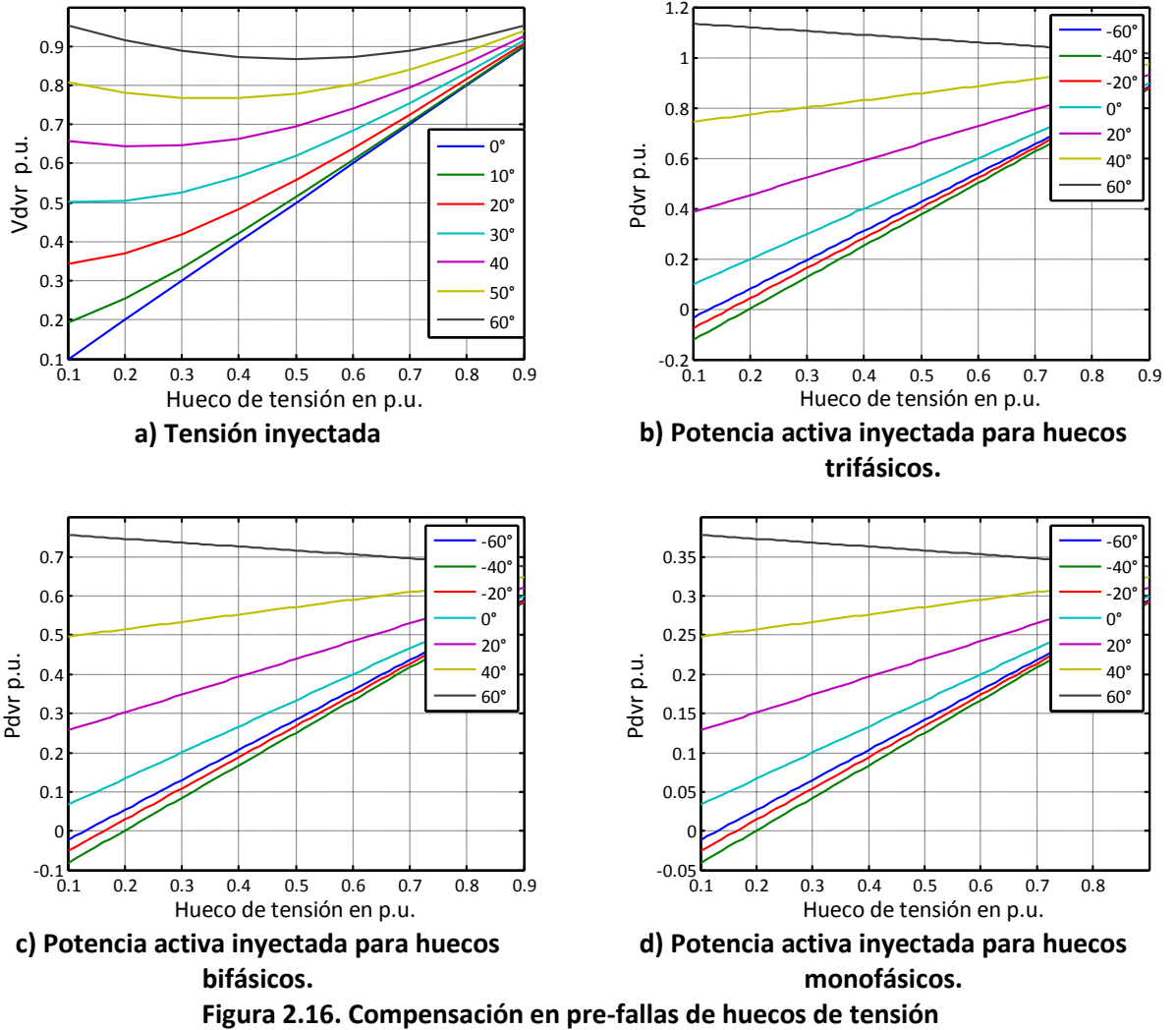
Donde ε es el factor de reducción o aumento de la tensión de alimentación definido en la ecuación (2.4).

En las siguientes figuras se muestra la magnitud de la tensión eficaz por fase y la potencia activa trifásica que debe inyectar el DVR para diferentes valores de huecos y elevaciones de tensión, para diferentes saltos de fase. Se consideran casos de huecos/elevaciones trifásicos, bifásicos y monofásicos. El factor de potencia de la carga se toma de 0.8 en atraso.

Los valores de tensión en las gráficas se muestran en p.u. de la tensión nominal fase-neutro de la carga y los valores de potencia activa en p.u. de la potencia activa trifásica de la carga.

Para el caso de fallas trifásicas se muestra la tensión por fase y la potencia trifásica que debe inyectar el DVR (figuras 2.16.a, 2.16.b, 2.17.a y 2.17.b).

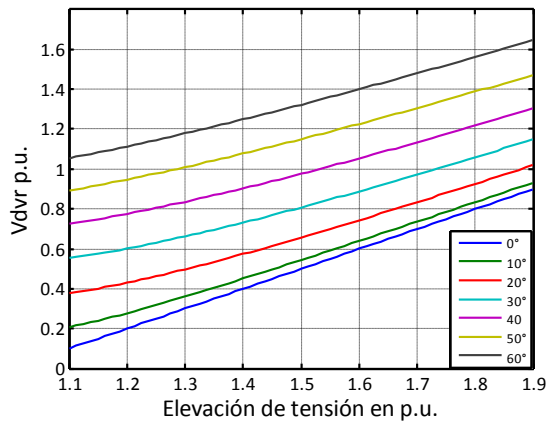
En el caso de fallas monofásicas o bifásicas solo es necesario mostrar la potencia trifásica total que debe inyectar el DVR (Figuras 2.16.c, 2.16.d, 2.17.c y 2.17.d), pues el valor de tensión a inyectar por cada fase corresponde al mismo caso de fallas trifásicas, pero solo en las fases donde ocurre el hueco de tensión. En estos casos se consideran huecos o elevaciones de igual magnitud y salto de fase en cada una de las fases del sistema.



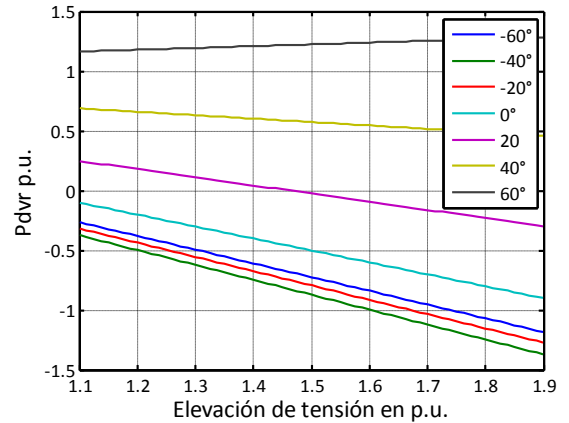
Para la gráfica de la Figura 2.16.a, se puede evidenciar que el DVR debe inyectar una tensión mayor a la caída de tensión correspondiente, la cual aumenta significativamente a medida que el salto de fase en la tensión de alimentación es mayor. Esta condición es más crítica para el caso de huecos de tensión de poca profundidad.

En cuanto a la potencia activa inyectada por el DVR como se muestra en la Figura 2.16.b es necesario tener en cuenta que existen casos para saltos de fases mayores a 50° en los cuales la potencia activa entregada por el DVR es mayor que la consumida por la carga, lo cual implica que parte de la potencia inyecta por el DVR será absorbida por el sistema de alimentación.

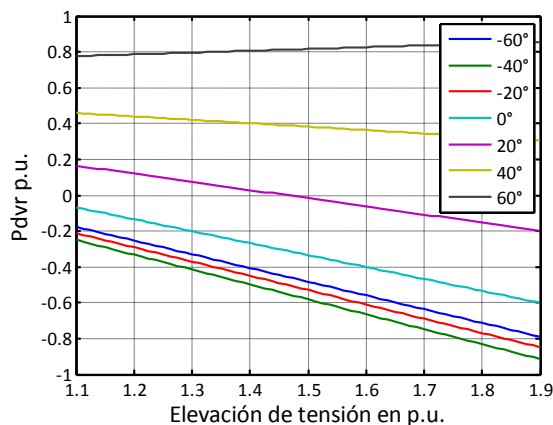
Además de acuerdo a lo observado en las graficas de potencia activa inyectada para los diferentes casos de huecos de tensión se debe considerar que en esta estrategia de compensación para algunos saltos de fase el DVR absorbe potencia activa del sistema de alimentación.



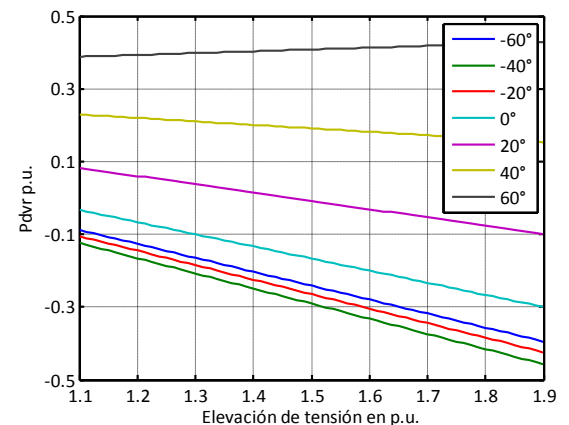
a) Tensión inyectada.



b) Potencia activa inyectada para elevaciones trifásicas.



c) Potencia activa inyectada para elevaciones bifásicas.



d) Potencia activa inyectada para elevaciones monofásicas.

Figura 2.17. Compensación en pre-fallas de elevaciones de tensión

En la gráfica presentada en la Figura 2.17.a se muestra el comportamiento de la tensión inyectada por el DVR para condiciones de elevaciones de tensión, en la cual se puede notar una inyección de tensión mayor a la tensión nominal de la carga hasta en 1,6 veces.

Con respecto a la potencia inyectada, al igual que en el caso de huecos de tensión debe considerarse que para algunos casos de elevaciones la potencia activa entregada por el DVR es mayor a la nominal de la carga y para otros casos el DVR absorbe potencia del sistema de alimentación.

2.3.2. Compensación en fase

En esta estrategia la tensión compensada en la carga está en fase con la tensión de alimentación durante la falla (ver Figura 2.18), independientemente de la corriente de carga y la tensión de pre-falla, por tanto la magnitud de la tensión inyectada por el DVR es minimizada pero el salto de fase no es compensado [39-41], [47].

En la Figura 2.18 se presenta el diagrama fasorial por fase para la compensación de huecos y elevaciones de tensión con la estrategia de compensación en fase. De acuerdo a estos diagramas se pueden obtener las ecuaciones para la magnitud de la tensión y la potencia activa inyectada por fase por el DVR.

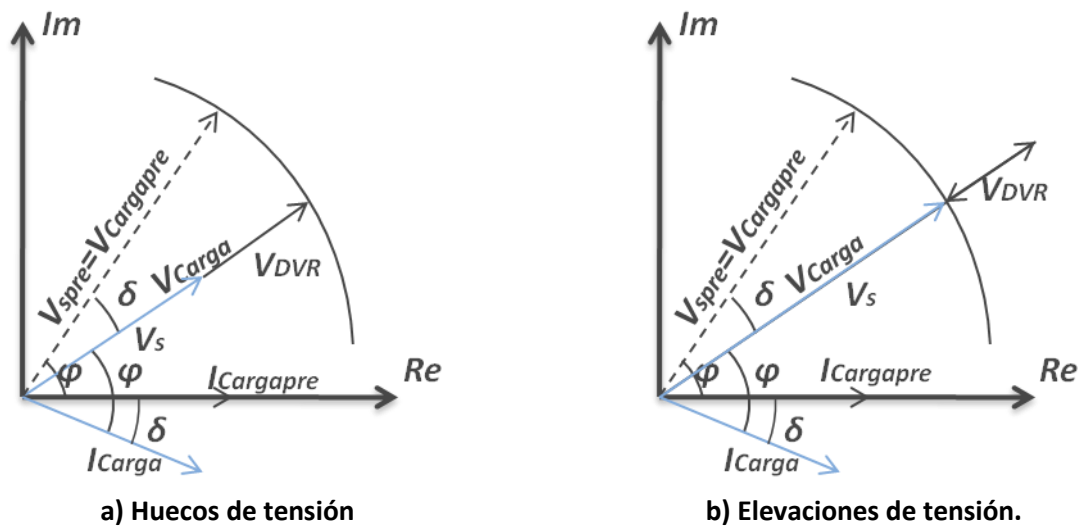


Figura 2.18. Diagrama fasorial para compensación en fase.

La ecuación para la magnitud de tensión inyectada es:

$$V_{DVR} = |\varepsilon| \cdot V_{carga} \quad (2.14)$$

En este caso se toma el valor absoluto de ε , teniendo en cuenta que este puede ser positivo o negativo dependiendo si hay un hueco o una elevación de tensión respectivamente.

La potencia activa por fase:

$$P_{DVRj} = V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot \varepsilon \cdot \cos(\varphi) \quad (2.15)$$

En la Figura 2.19 se presenta el diagrama fasorial de un sistema en el cual dos de las tensiones de fase se ven sometidas a una perturbación con magnitud y salto de fase igual. En este caso el DVR debe inyectar una tensión en la fase que no presenta falla con el fin de mantener un sistema equilibrado en tensiones en la carga.

En el caso de elevaciones o huecos monofásicos o bifásicos, las ecuaciones para el cálculo de la magnitud de la tensión y la potencia activa inyectada por cada fase del DVR se pueden deducir a partir de la Figura 2.19. Por tanto, para las fases sin falla se utilizan las ecuaciones (2.14) y (2.15) respectivamente. Para las fases que no presentan falla se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V_{DVRj} = \sqrt{V_{sj}^2 + V_{carga}^2 - 2 \cdot V_{sj} \cdot V_{carga} \cdot \cos(\delta)} \quad (2.16)$$

$$P_{DVRj} = V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot (\cos(\varphi) - \cos(\varphi - \delta)) \quad (2.17)$$

Siendo δ el salto de fase en la fase de referencia.

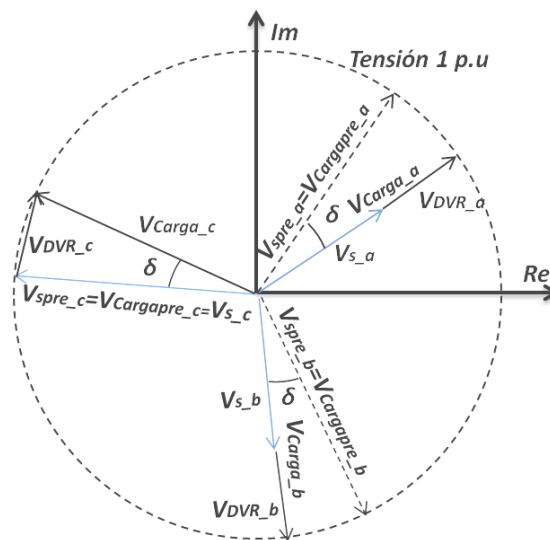


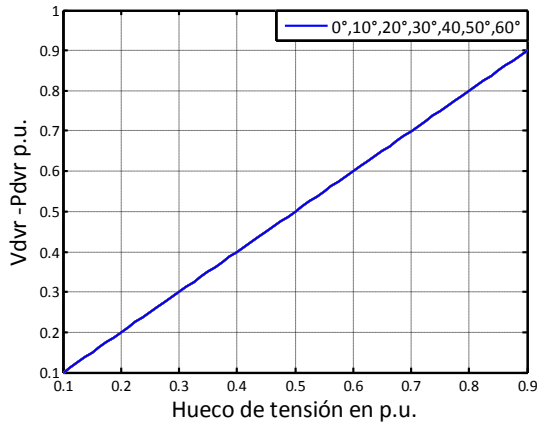
Figura 2.19. Diagrama fasorial trifásico para compensación en fase.

En las siguientes figuras se muestra la magnitud de tensión por fase y la potencia activa trifásica que debe inyectar el DVR para diferentes valores de huecos y elevaciones de tensión cada uno con diferentes saltos de fase. Se consideran casos de huecos/elevaciones trifásicas, bifásicas y monofásicas. El factor de potencia de la carga se toma de 0,8 en atraso.

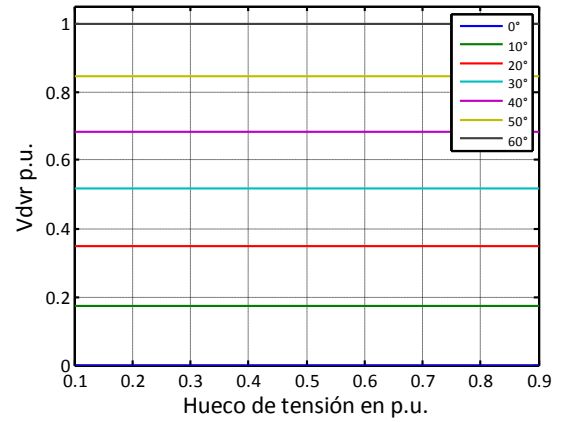
Los valores se muestran en p.u., manteniendo los valores bases establecidos para la compensación en pre-falla.

Para el caso de fallas trifásicas se muestra la tensión por fase y la potencia activa trifásica que debe inyectar el DVR (figuras 2.20.a, 2.21.a y 2.21.c).

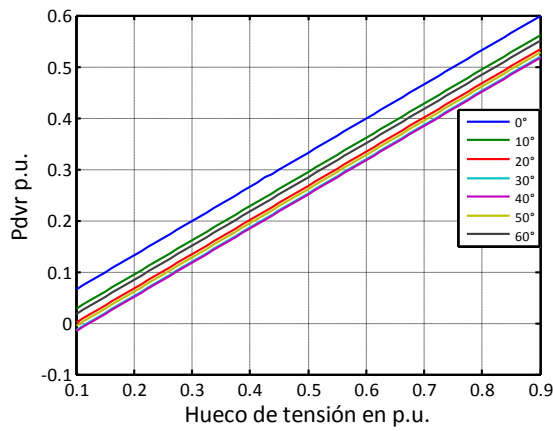
En el caso de fallas monofásicas o bifásicas se muestra la tensión inyectada en las fases que no presentan falla (Figuras 2.20.b y 2.21.b) y la potencia activa total que debe inyectar el DVR (figuras 2.20.c ,2.20.d, 2.21.c y 2.21.d). La tensión inyectada en las fases bajo falla corresponde al mismo de caso de fallas trifásicas.



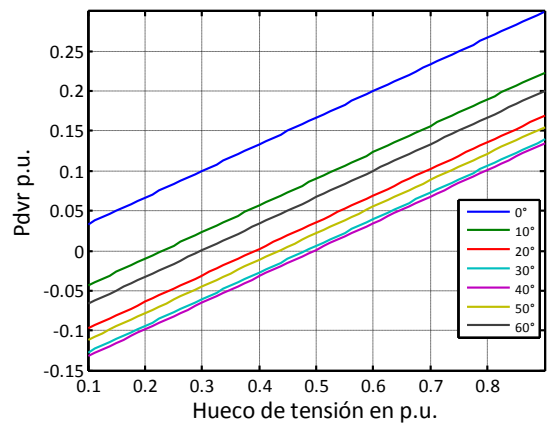
a) Tensión inyectada en las fases con hueco y potencia activa inyectada para huecos trifásicos.



b) Tensión inyectada en las fases sin hueco.



c) Potencia activa inyectada para huecos bifásicos.



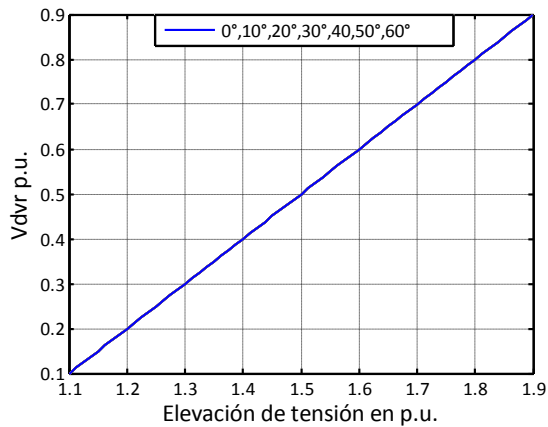
d) Potencia activa inyectada para huecos monofásicos.

Figura 2.20. Compensación en fase de huecos de tensión.

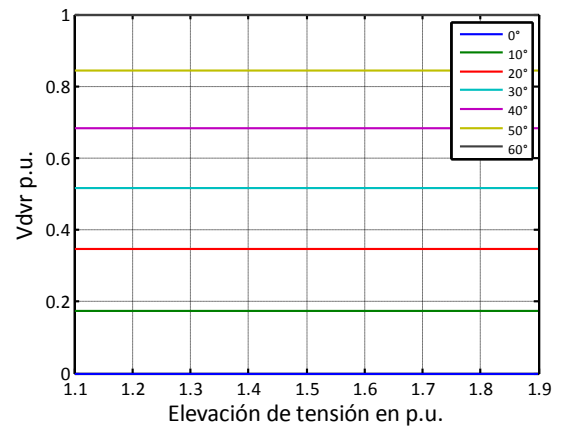
En la Figura 2.20.a se muestra el comportamiento de la tensión y la potencia activa inyectada por el DVR, cuyos valores son iguales teniendo en cuenta que al expresar las ecuaciones (2.14) y (2.15) en p.u. estos solo dependen del valor de ε .

Para el caso de las tensiones a inyectar en las fases que no presentan huecos de tensión se puede concluir que estas no dependen de la magnitud del hueco de tensión, pero si están directamente relacionadas con el salto de fase de la tensión en la fase de referencia de acuerdo a lo expresado en la ecuación (2.16).

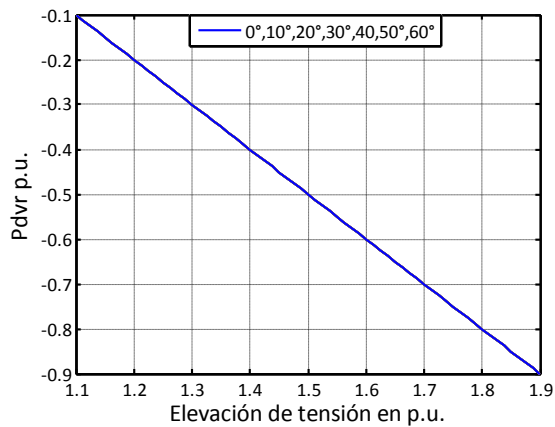
Las figuras a continuación muestran el comportamiento de la tensión y potencia activa inyectada para el caso de elevaciones de tensión.



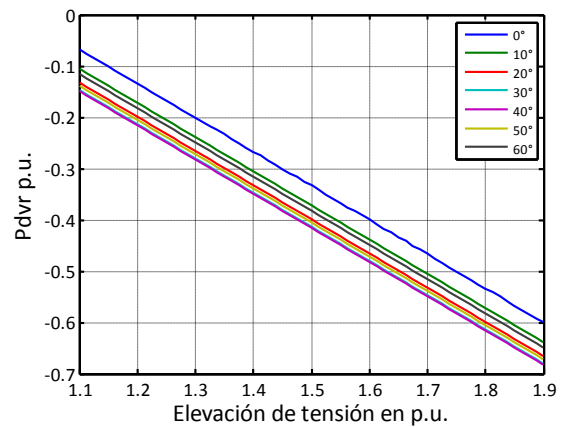
a) Tensión inyectada en las fases con elevaciones.



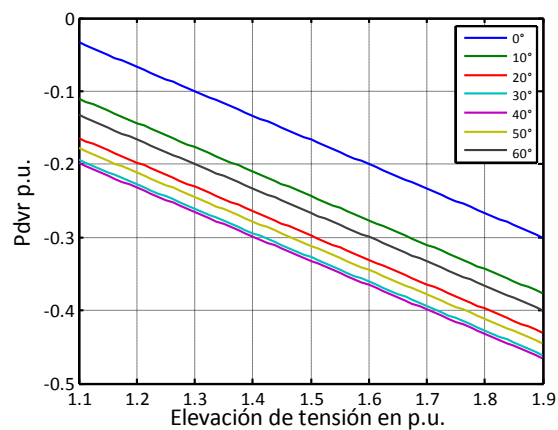
b) Tensión inyectada en las fases sin elevaciones.



c) Potencia activa inyectada para elevaciones trifásicas.



d) Potencia activa inyectada para elevaciones bifásicas.



e) Potencia activa inyectada para elevaciones monofásicas
Figura 2.21. Compensación en fase de elevaciones de tensión.

La Figura 2.21.b, muestran el comportamiento de la tensión inyectada por el DVR en las fases sin elevación, la cual no depende de la magnitud de la perturbación sino del salto de fase correspondiente en la fase de referencia.

En cuanto a la potencia activa inyectada por el DVR de acuerdo a las gráficas presentadas para huecos y elevaciones se puede establecer que para el caso de las fases donde se presenta una caída de tensión, el DVR debe entregar potencia activa para todos los casos, mientras que en el caso de elevaciones de tensión el DVR debe absorber potencia activa para todos los casos.

En las fases sin falla el flujo de potencia activa depende del salto de fase, por lo cual para algunos casos el DVR debe entregar o absorber potencia activa según se requiera.

2.3.3. *Compensación de avance de fase o de energía optimizada [42], [49]*

Esta estrategia permite reducir el consumo de la energía almacenada en la barra de continua mediante inyección de potencia reactiva en lugar de potencia activa. El diagrama fasorial correspondiente a esta estrategia se muestra en la Figura 2.22, donde V_s , V_{carga} , I_{carga} , φ , δ y α representan la tensión de alimentación medida en el punto de acople común (PCC), la tensión en la carga compensada por el DVR, la corriente de carga, el ángulo del factor de potencia de la carga, el salto de fase en la tensión de alimentación durante la falla y el ángulo de avance de la tensión compensada en la carga, respectivamente.

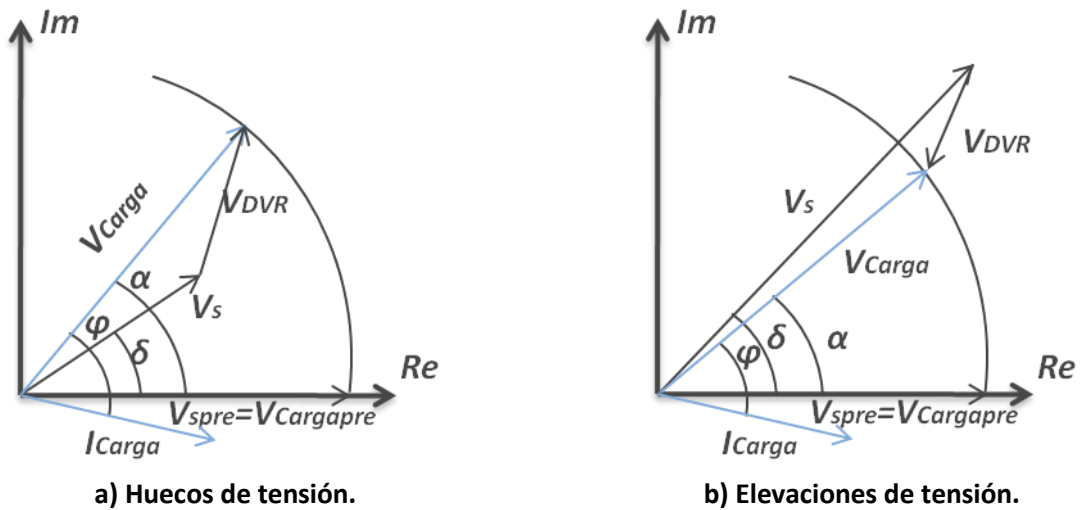


Figura 2.22. Diagrama fasorial para compensación con energía optimizada.

En el estudio de esta estrategia de compensación es necesario realizar el análisis del balance de potencia activa, para lo cual se denota P_{in} y P_{out} como la potencia activa suministrada por el sistema de alimentación y la potencia activa de la carga respectivamente, por tanto:

$$P_{in} = \sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I_{carga j} \cdot \cos(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.18)$$

$$P_{out} = \sum_{\forall j} V_{carga j} \cdot I_{carga j} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.19)$$

Donde el subíndice j representa cada fase del sistema.

Teniendo en cuenta la corrección de tensión realizada por el DVR, asumiendo carga balanceada ($I_j = I$) y tensión de salida equilibrada ($V_{carga j} = V_{carga}$), la potencia activa consumida por la carga puede escribirse como:

$$P_{out} = 3 \cdot V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.20)$$

La potencia activa suministrada por el DVR se determina a partir de las ecuaciones (2.18) y (2.19) expresada como:

$$P_{DVR} = 3 \cdot V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot \cos(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I_{carga j} \cdot \cos(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.21)$$

De forma similar se pueden escribir las ecuaciones para la potencia reactiva.

$$Q_{in} = \sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I_{carga j} \cdot \sin(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.22)$$

$$Q_{out} = \sum_{\forall j} V_{carga j} \cdot I_{carga j} \cdot \sin(\varphi) = 3 \cdot V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot \sin(\varphi) \quad (2.23)$$

La potencia reactiva suministrada por el DVR en régimen sinusoidal es entonces:

$$Q_{DVR} = 3 \cdot V_{carga} \cdot I_{carga} \cdot \sin(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I_{carga j} \cdot \sin(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.24)$$

Analizando las ecuaciones (2.21) y (2.24) se puede deducir que el intercambio de potencia activa y reactiva entre el DVR y el sistema de distribución se puede controlar con el ajuste del ángulo α .

En esta estrategia de compensación, solo la magnitud de la tensión restaurada en la carga V_{carga} debe ser mantenida a la magnitud de tensión de pre-falla. Por tanto P_{DVR} depende solo del ángulo de avance α cuando V_{sj} y δ_j están dados por las condiciones de falla. En efecto, dependiendo del valor de α la potencia activa inyectada por el DVR puede ser controlada para que sea positiva, negativa o en algunos casos cero.

A continuación se presenta el análisis para los casos de cero y mínima inyección de potencia activa.

Caso 1. Operación con $P_{DVR} = 0$

En este modo de operación el valor de α se determina al igualar a cero la ecuación (2.21). Este ángulo es llamado α_{opt} y está dado por:

$$\alpha_{opt} = \varphi + \beta - \cos^{-1} \left(\frac{3 \cdot V_{carga} \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (2.25)$$

Donde:

$$X = \sum V_{sj} \cdot \cos(\delta_j) \quad (2.26)$$

$$Y = \sum V_{sj} \cdot \sin(\delta_j) \quad (2.27)$$

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (2.28)$$

De la ecuación (2.25) se deduce la condición de existencia para α_{opt} :

$$\sqrt{X^2 + Y^2} \geq 3 \cdot V_{carga} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.29)$$

Por tanto la compensación de tensión con inyección de potencia cero solo es posible si la condición impuesta por (2.29) se cumple.

Si se considera un hueco de tensión balanceado, el factor $\sqrt{X^2 + Y^2}$ es igual a $3 \cdot V_s$ para el cual la condición de la ecuación (2.29) se satisface si y solo si el valor de la tensión mantenida en V_s durante el hueco de tensión es mayor que el factor de potencia de la carga, asumiendo la compensación de V_{carga} a 1 p.u. Por tanto debe cumplir:

$$\frac{V_s}{V_{carga}} \geq \cos(\varphi) \quad (2.30)$$

$$V_{s\text{ p.u.}} \geq fp \quad (2.31)$$

En los casos en los cuales la condición de la ecuación (2.31) no se pueda cumplir, se debe buscar entonces una inyección mínima de potencia activa.

Caso 2. Inyección de mínima potencia activa ($P_{DVR} > 0$)

Este modo de operación se plantea para la compensación de huecos severos de tensión para los cuales la ecuación (2.29) no se satisface. En este caso el valor óptimo de α puede ser calculado como:

$$\frac{dP_{DVR}}{d\alpha} = 0 \quad (2.32)$$

Por tanto:

$$\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I \cdot \sin(\varphi - \alpha + \delta_j) = 0 \quad (2.33)$$

Despejando α :

$$\alpha_{opt} = \varphi + \beta \quad (2.34)$$

Los resultados de los casos 1 y 2 pueden combinarse para determinar el valor óptimo de α para cualquier perturbación teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

Si

$$\left[\left(\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \cos(\delta_j) \right)^2 + \left(\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \sin(\delta_j) \right)^2 \right]^{1/2} \geq 3 \cdot V_{carga} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.35)$$

Entonces

$$\begin{aligned} \alpha_{opt} = \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \sin(\delta_j)}{\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \cos(\delta_j)} \right) \\ + \arccos \left(\frac{3 \cdot V_{carga} \cdot \cos(\varphi)}{\left(\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \cos(\delta_j) \right)^2 + \left(\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \sin(\delta_j) \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Sino

$$\alpha_{opt} = \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \sin(\delta_j)}{\sum_{\forall j} V_{sj} \cdot \cos(\delta_j)} \right) \quad (2.37)$$

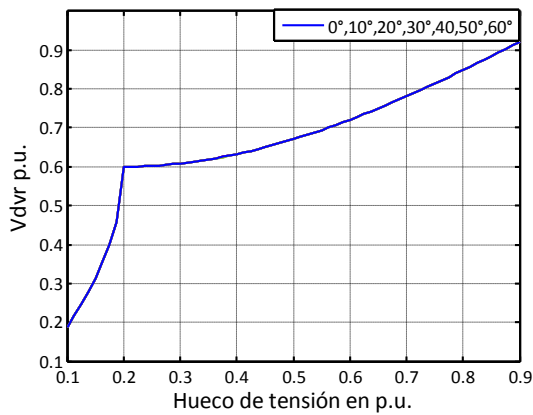
Las ecuaciones para la tensión de inyección del DVR y la potencia activa requerida bajo esta estrategia son:

$$V_{DVRj} = \sqrt{V_{carga}^2 + V_{sj}^2 - 2 \cdot V_s \cdot V_L \cdot \cos(\alpha_{opt} - \delta_j)} \quad (2.38)$$

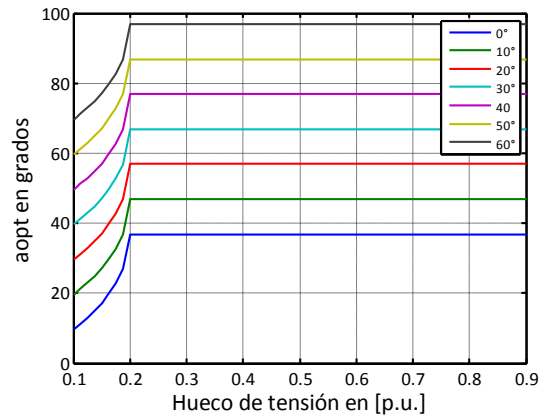
$$P_{DVR_opt} = 3 \cdot V_{carga} \cdot I \cdot \cos(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{sj} \cdot I_{carga} \cdot \cos(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.39)$$

En las figuras 2.23.a, 2.23.d, 2.23.e, 2.23.h y 2.23.i se muestra la magnitud en valores RMS de la tensión por fase que debe inyectar el DVR obtenidas a partir de la ecuación (2.38) para diferentes huecos de tensión. Los saltos de fase introducidos por esta estrategia para cada tipo de hueco se presentan en las figuras 2.23.b, 2.23.f y 2.23.j. La potencia activa total que debe inyectar el DVR para estos mismos casos se muestra en las figuras 2.23c, 2.23.g y 2.23.k.

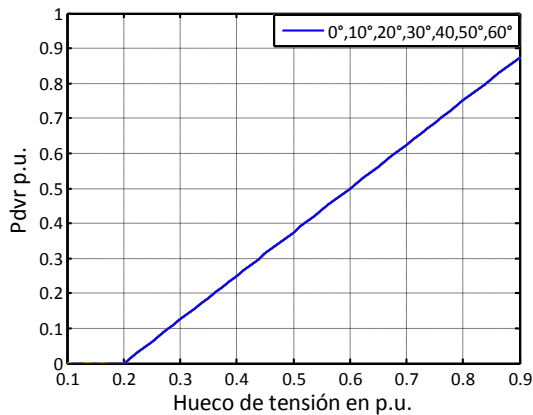
En las gráficas donde se presenta el salto de fase de la tensión en la carga, la etiqueta del eje de la ordena es denotada como (α_{opt}) que representa el valor de α_{opt} calculado a partir de las ecuaciones (2.25) y (2.34).



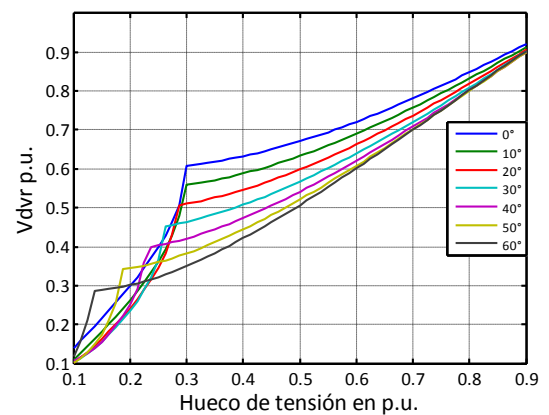
a) Tensión por fase inyectada para huecos trifásicos.



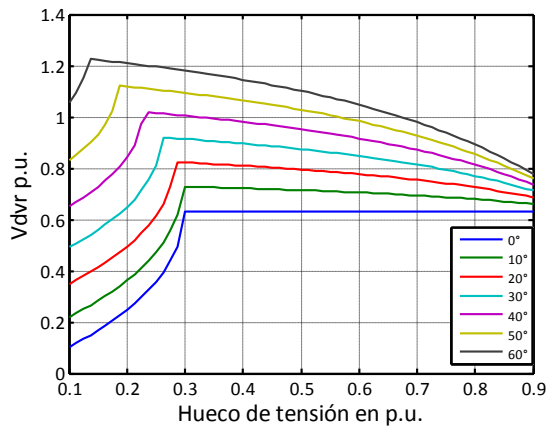
b) Salto de fase en la carga para huecos trifásicos.



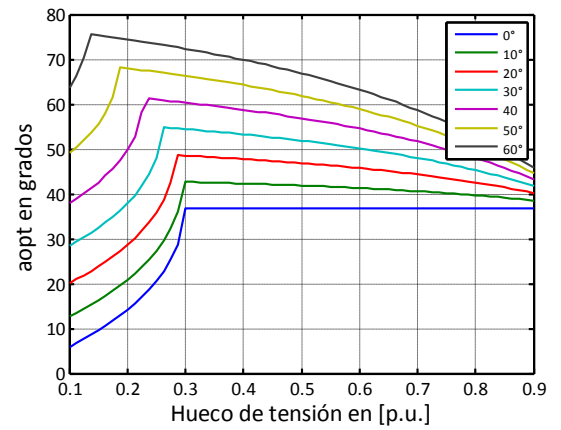
c) Potencia activa total inyectada para huecos trifásicos.



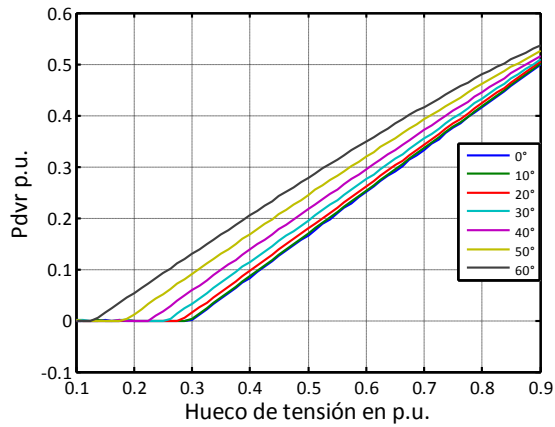
d) Tensión por fase inyectada para huecos bifásicos en las fases con hueco.



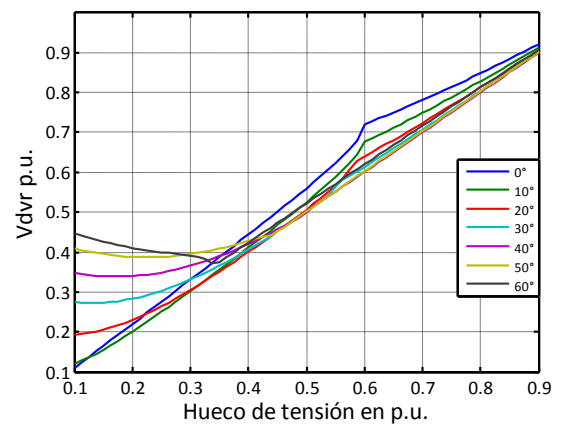
e) Tensión por fase inyectada para huecos bifásicos en la fase sin hueco.



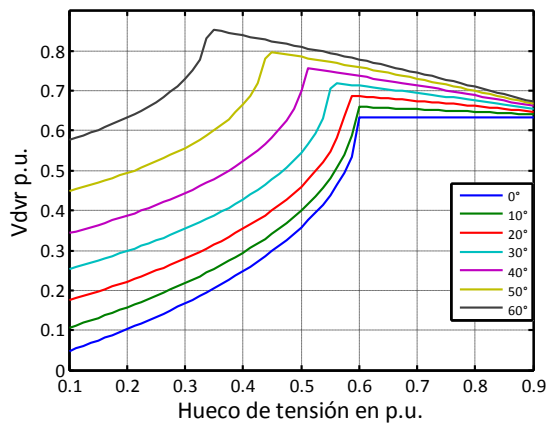
f) Salto de fase en la carga para huecos bifásicos.



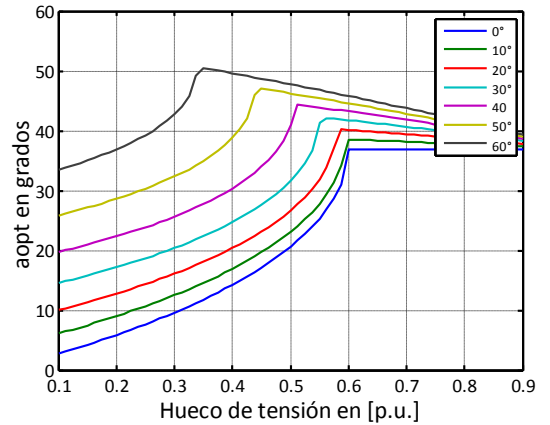
g) Potencia activa total inyectada para huecos bifásicos.



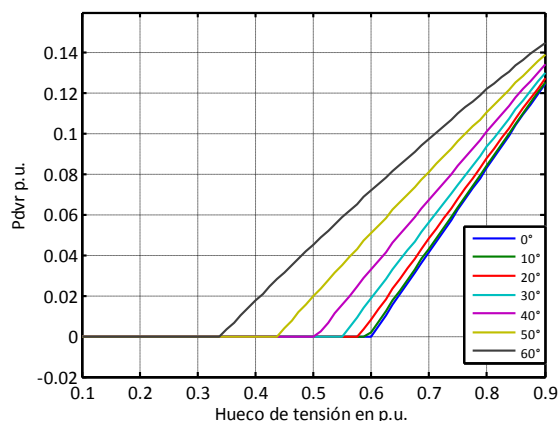
h) Tensión por fase inyectada para huecos monofásicos en la fase con hueco.



i) Tensión por fase inyectada para huecos monofásicos en las fases sin hueco.



j) Salto de fase en la carga para huecos monofásicos.



k) Potencia activa total inyectada para huecos monofásicos.

Figura 2.23. Compensación con energía optimizada de huecos de tensión.

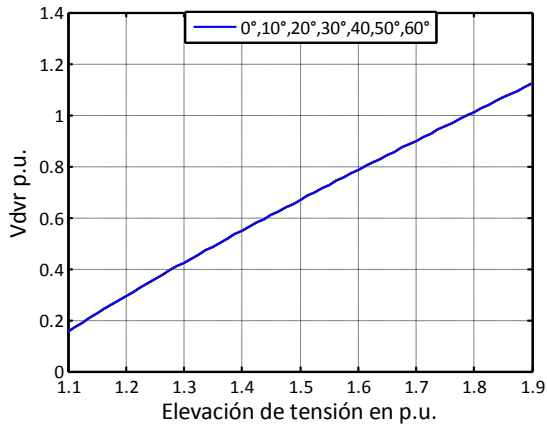
En la Figura 2.23.a se puede establecer que para huecos trifásicos balanceados, la magnitud de la tensión que debe inyectar el DVR depende solo de la magnitud del hueco de tensión presente en la tensión de alimentación independientemente del salto de fase. Para todos los casos el DVR debe inyectar una tensión de magnitud mayor a la del hueco correspondiente.

Analizando las gráficas 2.23.c, 2.23.g y 2.23.k, se puede establecer que existe un rango de valores de para huecos de tensión en los cuales el DVR no inyecta potencia activa. Este rango varía de acuerdo al tipo de hueco de tensión (monofásico, bifásico o trifásico) y al salto de fase presente en la tensión de alimentación durante la falla.

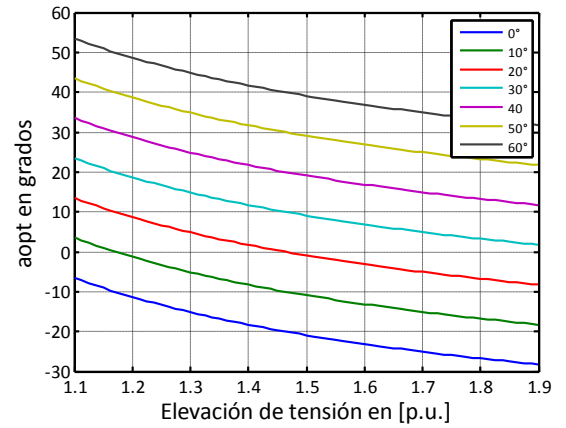
Para los gráficos que muestran en el comportamiento del salto de fase en la tensión de la carga se puede concluir que para el caso de huecos de tensión el salto de fase siempre estará en adelante con respecto al salto de fase en la tensión de alimentación.

De igual se puede establecer una relación directa entre la tensión en las fases no falladas y el salto de fase como puede observarse en las figuras 2.23.e y 2.23.f o en los gráficos de las figuras 2.23.i y 2.23.j, ya que la ecuación (2.38) que expresa la tensión inyectada en las fases no falladas queda dependiente únicamente del valor de α_{opt} calculado.

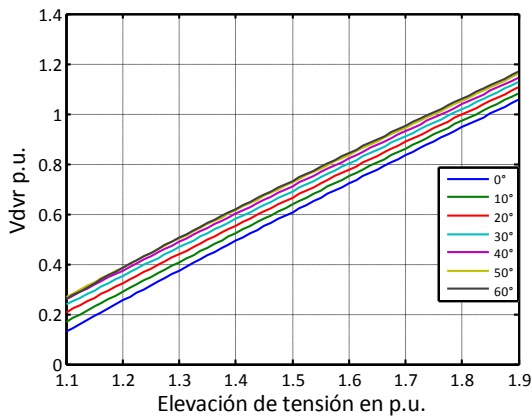
En las figuras 2.24.a, 2.24.c, 2.24.d, 2.24.f y 2.24.g se muestra la magnitud de tensión por fase que debe inyectar el DVR obtenida a partir de la ecuación (2.38) para diferentes elevaciones de tensión. Los saltos de fase en la tensión de carga se muestran en las figuras 2.24.b, 2.24.e y 2.24.h, calculados a partir de la ecuación (2.36). La potencia activa total que debe inyectar el DVR para las diferentes elevaciones de tensión de acuerdo a la ecuación (2.39) siempre es cero.



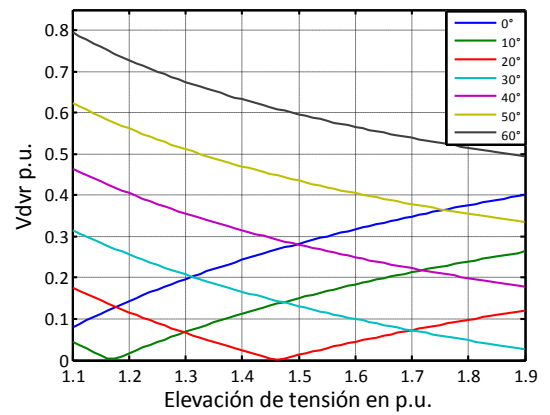
a) Tensión por fase inyectada para elevaciones trifásicas.



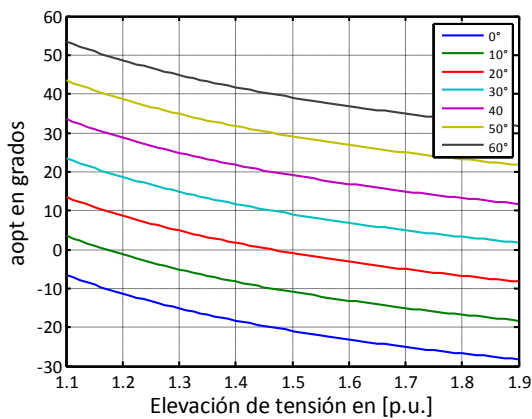
b) Salto de fase en la tensión de la carga para elevaciones trifásicas.



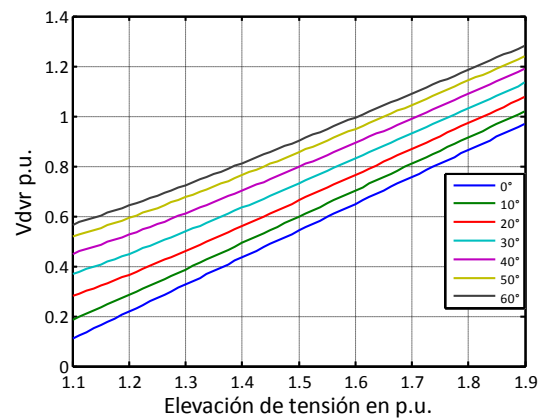
c) Tensión por fase inyectada para elevaciones bifásicas en las fases con elevación.



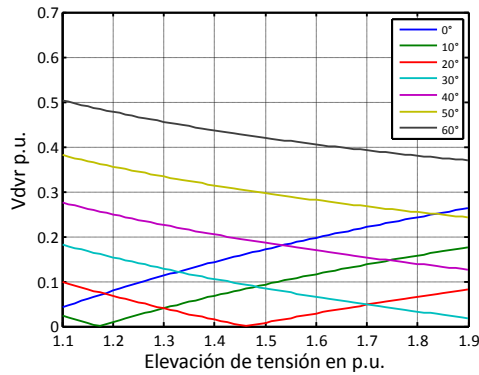
d) Tensión por fase inyectada para elevaciones bifásicas en la fase sin elevación.



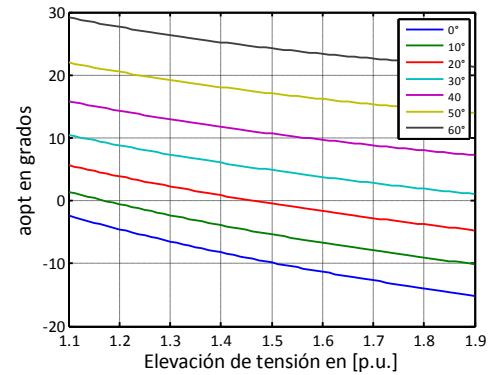
e) Salto de fase en la tensión de la carga para elevaciones bifásicas.



f) Tensión por fase inyectada para elevaciones monofásicas en la fase con elevación.



g) Tensión por fase inyectada para elevaciones monofásicas en las fases sin elevación.



h) Salto de fase en la tensión de la carga para elevaciones monofásicas.

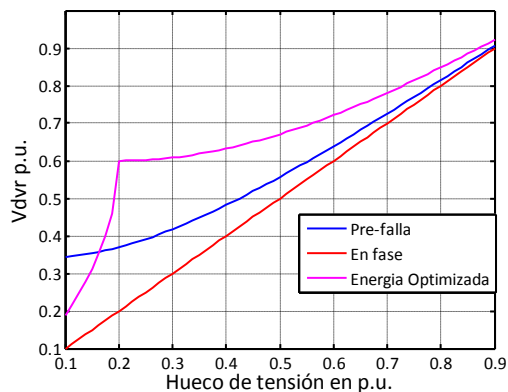
Figura 2.24. Compensación con energía optimizada para elevaciones de tensión.

Los gráficos de tensión inyectada para los casos de elevaciones de tensión para las fases perturbadas conservan un comportamiento similar a de huecos de tensión con el fin de mantener la magnitud la tensión de la carga, mientras que para el caso de las fases no falladas inyecta una tensión con el fin de mantener un sistema equilibrado en tensiones, lo que a su vez lo lleva a absorber potencia activa del sistema en algunos casos por medio de estas fases.

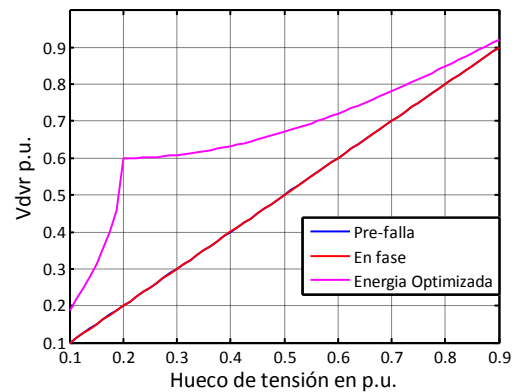
De los gráficos 2.24.b, 2.24e y 2.24.h puede inferirse que el salto de fase presente en la carga durante la perturbación corresponderá a un salto de fase en atraso con respecto al salto de fase en la tensión para todos los casos de elevaciones de tensión.

Comparación de estrategias

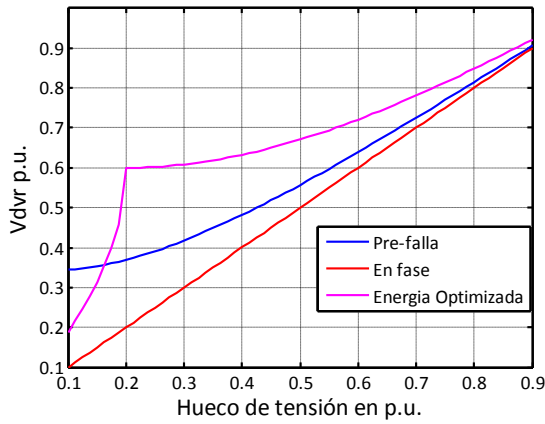
A continuación se presentan gráficos comparativos de la tensión por fase inyectada por el DVR para cada una de las estrategias utilizadas en la compensación de huecos y elevaciones de tensión trifásicas equilibradas. Esto con fin de tener una base para realizar el análisis comparativo en el Capítulo 4 con los resultados de simulación.



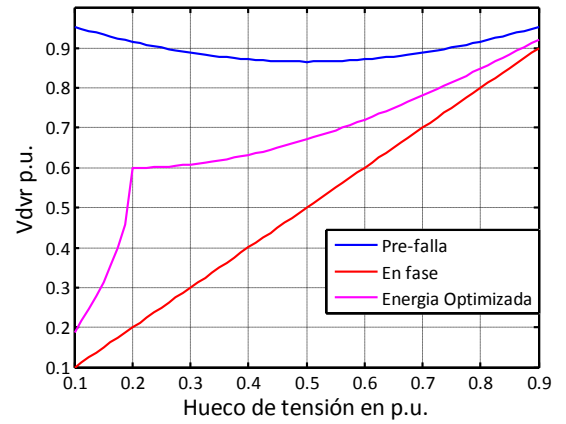
a) Salto de fase -20°



b) Salto de fase 0°



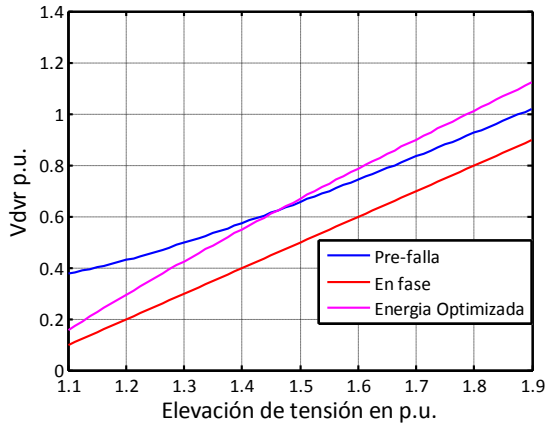
c) Salto de fase 20°



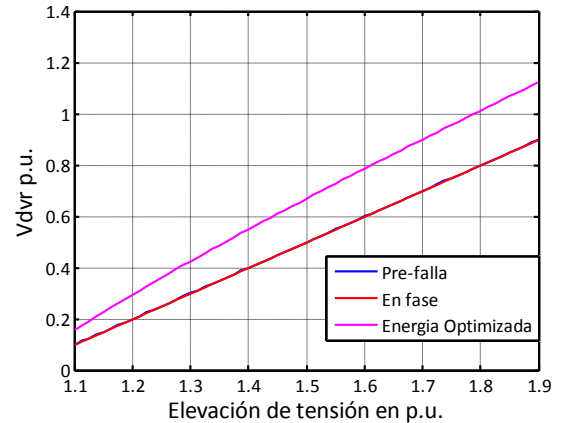
d) Salto de fase 60°

Figura 2.25. Tensión por fase inyectada por el DVR para huecos de tensión trifásicos.

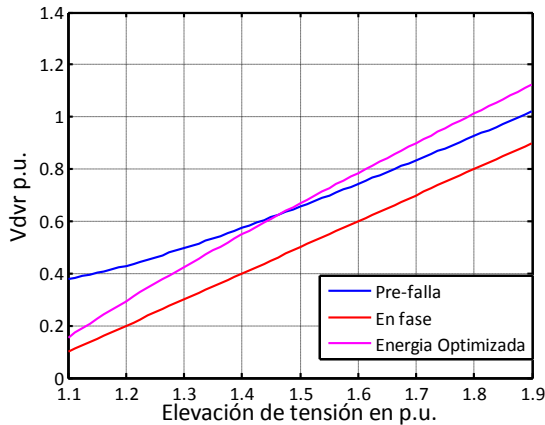
De acuerdo a lo observado en las gráficas de la Figura 2.25 se puede evidenciar que el uso de la estrategia de compensación en fase, corresponde a la estrategia en la cual la inyección de tensión por parte del DVR será la menor para todos los casos, mientras que en la utilización de estrategias compensación en pre-falla o en energía optimizada inyectan un valor mayor dependiendo del tipo de hueco de tensión y salto de fase.



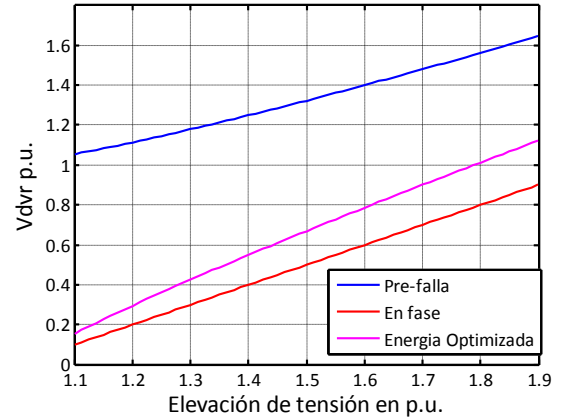
a) Salto de fase -20°



b) Salto de fase 0°



c) Salto de fase 20°

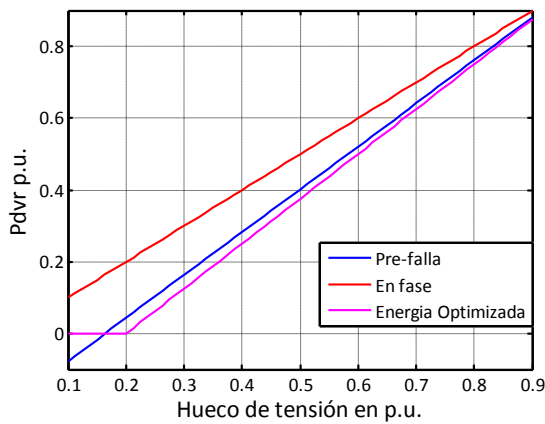


d) Salto de fase 60°

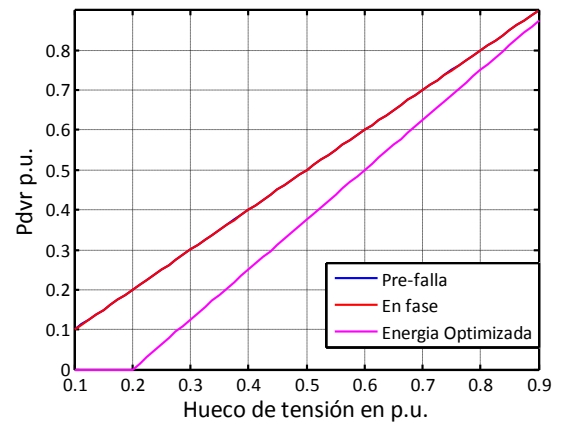
Figura 2.26. Tensión por fase inyectada por el DVR para elevaciones de tensión trifásicas.

En cuanto a la tensión inyectada por el DVR para la compensación de elevaciones de tensión trifásicas equilibradas se puede evidenciar un comportamiento similar al de los huecos de tensión en la cual la menor tensión inyectada corresponde a la estrategia de compensación en fase y la mayor para algunos casos corresponde la compensación con energía optimizada y para otros casos en pre-falla.

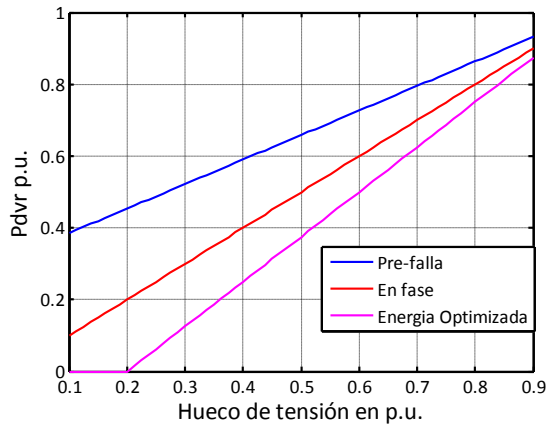
De igual manera para realizar un análisis comparativo en el Capítulo 4, se presentan en las figuras 2.27 y 2.28 las comparaciones entre la potencia activa total inyectada por el DVR para huecos y elevaciones trifásicas equilibradas.



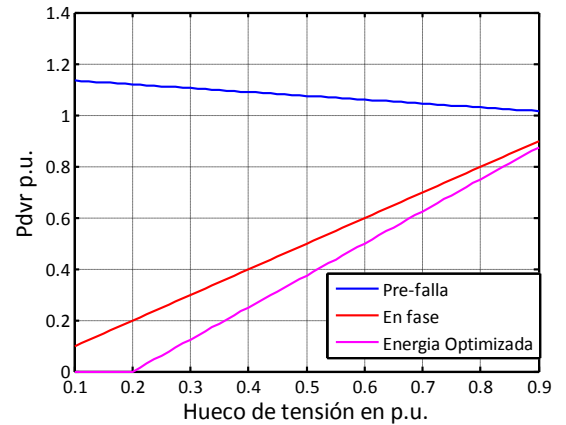
a) Salto de fase 0°



b) Salto de fase 20°



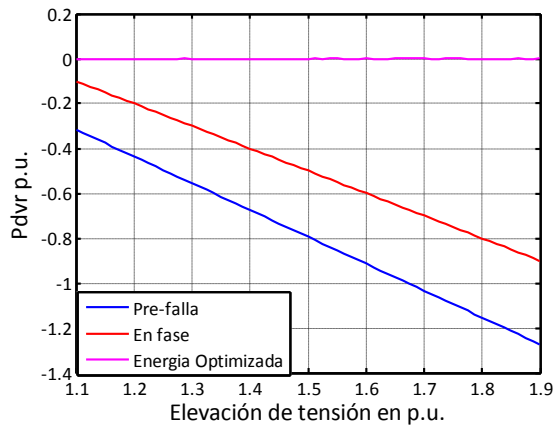
c) Salto de fase 40°



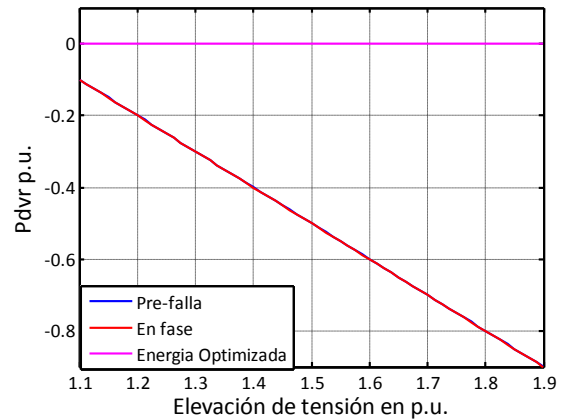
d) Salto de fase 60°

Figura 2.27. Potencia activa inyectada por el DVR para huecos de tensión.

En forma similar se puede deducir a partir de los gráficos de la Figura 2.27 que la estrategia de compensación que inyecta la menor potencia activa en la compensación de huecos de tensión corresponde a la estrategia de energía optimizada, teniendo en cuenta que para algunos casos es cero. Es necesario considerar adicionalmente que para algunos casos utilizando la estrategia de compensación en pre-falla el DVR absorbe potencia activa del sistema de alimentación lo cual ya se clarificó que no representa una ventaja para DVR ya que requerirá una unidad de almacenamiento mayor y un controlador en la barra de continua.



a) Salto de fase 0°



b) Salto de fase 20°

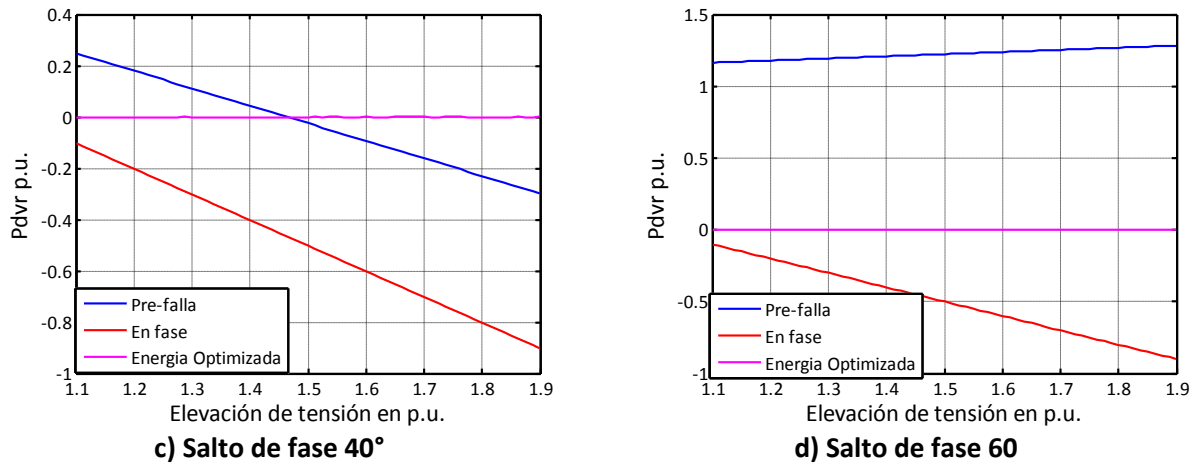


Figura 2.28. Potencia activa inyectada por el DVR para elevaciones de tensión.

Para el caso de elevaciones de tensión trifásicas se puede establecer a partir de la Figura 2.28 que la potencia activa entregada o absorbida por el DVR para el caso de energía optimizada es cero, mientras que para el caso de compensación en pre-falla en DVR debe manejar dos modos de operación, uno en el cual entrega potencia activa y para otros en el cual debe absorber potencia activa. Para el caso de compensación en pre falla se establece la absorción de potencia activa para todos los casos lo cual no representa ventajas para el DVR de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

2.4. Cálculo de las referencias

Las estructuras de control aplicadas al DVR son varias en general, pero se puede dividir en dos bloques fundamentales: la generación de la señal de referencia para la inyección de tensión, mediante la medición de la tensión del sistema de alimentación en PCC, y el control de la tensión de salida para garantizar que corresponde a la señal de referencia, que considera las variables de estado del filtro [49].

La generación de la señal de referencia depende en gran medida de los objetivos de compensación: huecos, elevaciones o armónicos de tensión. El valor eficaz de la tensión de sistema de alimentación puede ser medida para detectar huecos y elevaciones de tensión y sobretensiones, una vez detectado, se puede utilizar un PLL para sincronizar la señal de compensación, el cual debe ser bloqueado para mantener la fase anterior a la falla [50].

En todos estos casos es necesario que el sistema de control para el cálculo de la referencia del DVR, detecte no sólo el principio y el final de un hueco de tensión, sino también determine la profundidad de hueco o elevación y el ángulo de fase asociado al salto [51].

Los métodos para el cálculo de las referencias en el DVR se clasifican principalmente en dos grupos: los que operan en el dominio del tiempo y los que operan en el dominio de la frecuencia. Los métodos en el dominio del tiempo tienen una respuesta dinámica rápida, pero en algunos casos no permiten la compensación selectiva de las perturbaciones de tensión. Los métodos

basados en la FFT permiten la selección de las perturbaciones de tensión a compensar, pero tienen una respuesta dinámica lenta. Aunque, el uso de técnicas digitales que opera en el tiempo y en el dominio de la frecuencia, permite la compensación selectiva con respuesta dinámica rápida [50].

Algoritmos como el filtro de Kalman, los basados en Fourier, la transformada de Wavelet [51], y la transformación en el marco DQ0 [23], [24], [54], son utilizados en el DVR en la estimación de los parámetros de las señales de tensión de alimentación, los cuales se utilizan para calcular las señales de compensación.

En [51] se muestra la eficacia del algoritmo de filtro de Kalman y se compara con el algoritmo DFT. En este ejemplo, una caída de tensión del 50% se produce en el instante $t = 0,05$ segundos con un salto de fase de -28 grados. Se puede observar que el filtro de Kalman estima los parámetros mucho más rápido que el algoritmo DFT y requiere menos espacio de memoria para el cálculo.

Este proyecto se enfoca en el estudio de dos técnicas de control para el cálculo de las señales de referencia: el filtro de Kalman y la transformación DQ0, las cuales se analizan a continuación.

2.4.1. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado siguiente de un proceso en cada muestra de tiempo con base en la información disponible en la muestra $k-1$, y actualizarla, con la información adicional disponible en la muestra k . Este filtro es el principal algoritmo para estimar sistemas dinámicos especificados en la forma de espacio de estados [55].

El filtro lineal combina toda la información observada y el conocimiento previo acerca del comportamiento del sistema para producir una estimación del estado actual de tal manera que el error es minimizado estadísticamente. El término recursivo significa que el filtro recalcula la solución cada vez que una nueva observación o medida es incorporada en el sistema [51].

El filtro de Kalman tiene como objetivo resolver el problema general de estimar el estado x_k de un proceso controlado en tiempo discreto, el cual es determinado por una ecuación lineal en diferencia de la siguiente forma [51]:

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + w_{k-1} \quad (2.40)$$

Con una medida Z , que es:

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \quad (2.41)$$

Las variables aleatorias w_k y v_k representan el error del proceso y de la medida respectivamente. Se asume que son independientes entre ellas, que son ruido blanco y con distribución de probabilidad normal. La matriz A se asume de una dimensión $n \times n$ y relaciona el estado en el periodo previo $k-1$ con el estado en la muestra k . La matriz H de dimensión $m \times n$ relaciona el

estado con la medición Z_k . Estas matrices pueden cambiar en el tiempo, pero en general se asumen como constantes [50], [55], [56].

Desde este punto de vista las ecuaciones que se utilizan para el filtro de Kalman se pueden dividir en dos grupos: las que actualizan la muestra o ecuaciones de predicción y las que actualizan los datos observados o ecuaciones de actualización. Las del primer grupo son responsables de la proyección del estado al momento k tomando como referencia el estado en la muestra $k-1$ y de la actualización intermedia de la matriz de covarianza del estado. El segundo grupo de ecuaciones son responsables de la retroalimentación, es decir, incorporan nueva información dentro de la estimación anterior con lo cual se llega a una estimación mejorada del estado [51], [55].

Así el filtro de Kalman funciona por medio de un mecanismo de proyección y corrección al pronosticar el nuevo estado y su incertidumbre y corregir la proyección con la nueva medida. Este ciclo se muestra en la Figura 2.29 [55], [56].

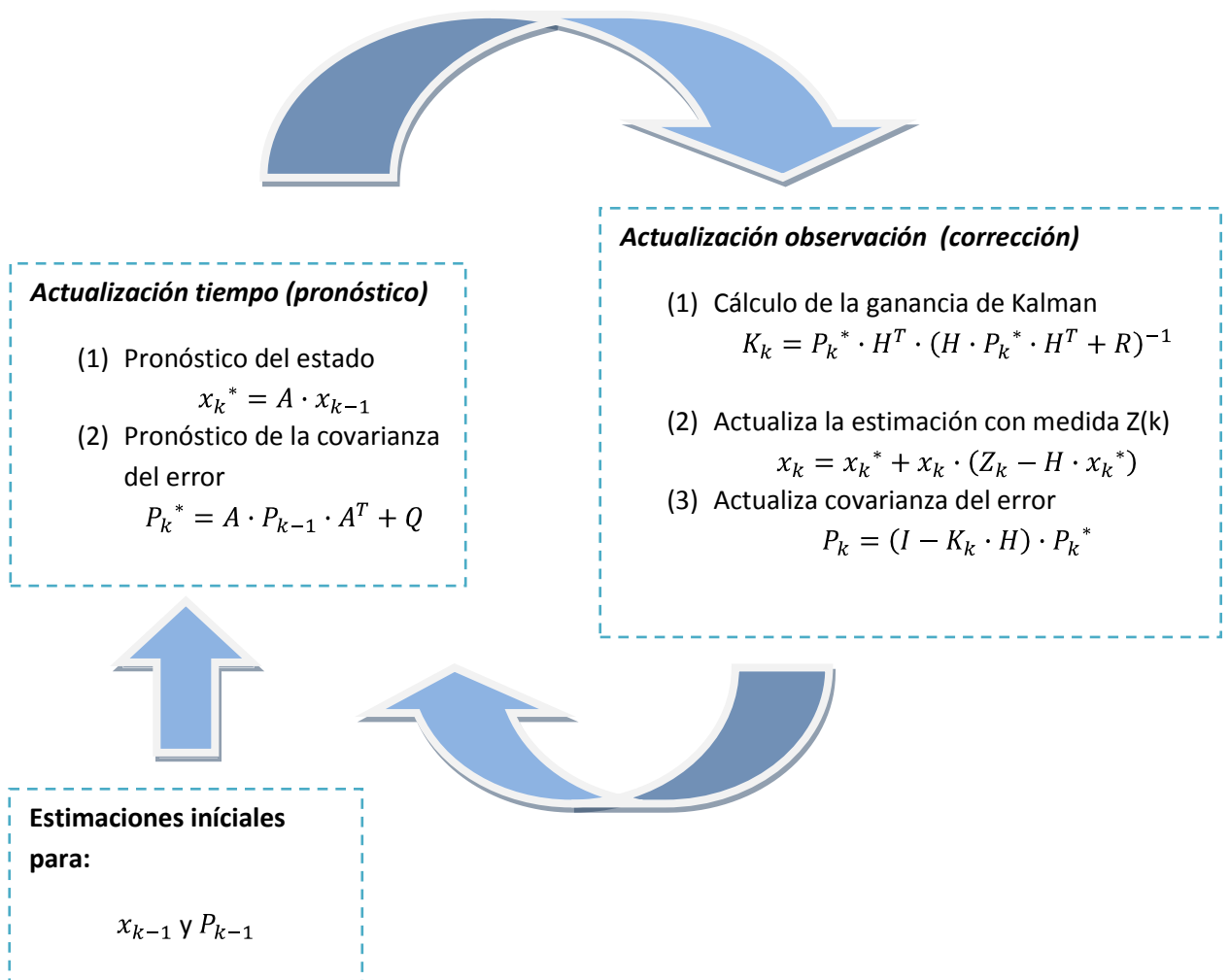


Figura 2.29. Proceso de estimación usando el filtro de Kalman.

En el caso de esta tesis el algoritmo de Kalman se aplica con el fin de detectar el comienzo y el final del hueco o elevación de tensión y su magnitud, tan pronto como sea posible. Para tal fin el filtrado de Kalman debe realiza las siguientes operaciones [51].

En primer lugar, es necesario disponer de una descripción matemática, tanto del sistema y de la medición. A continuación es necesario definir la señal a estudiar, la cual corresponderá a una señal sinusoidal expresada por la siguiente ecuación [50], [57]:

$$y_k = V_1(k) \cdot \cos(\omega \cdot k \cdot T_s + \varphi_1(k)) + \sum_{i=2}^n V_i(k) \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot k \cdot T_s + \varphi_i(k)) \quad (2.42)$$

Para el siguiente paso (k+1) [50] [57]

$$\begin{aligned} y_{k+1} = & V_1(k) \cdot \cos(\omega \cdot (k+1) \cdot T_s + \varphi_1(k)) + \sum_{h=2}^n V_h(k) \cdot \cos(i \cdot \omega \cdot (k+1) \cdot T_s + \varphi_h(k)) = \\ & V_1(k) \cdot \cos((\omega \cdot k \cdot T_s + \varphi_1(k)) + \omega \cdot T_s) \\ & + \sum_{h=2}^n V_h(k) \cdot \cos((h \cdot \omega \cdot k \cdot T_s + \varphi_h(k)) + h \cdot \omega \cdot T_s) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Considerando como variables de estado [56]:

$$\begin{aligned} x_{1,k} &= V_1(k) \cdot \cos(\theta_1) & x_{2,k} &= V_1(k) \cdot \sin(\theta_1) \\ x_{3,k} &= V_2(k) \cdot \cos(\theta_2) & x_{4,k} &= V_2(k) \cdot \sin(\theta_2) \\ x_{2n-1,k} &= V_n(k) \cdot \cos(\theta_n) & x_{2n,k} &= V_n(k) \cdot \sin(\theta_n) \end{aligned} \quad (2.44)$$

Para $\theta_h = h \cdot \omega \cdot T_s + \varphi_h(k)$

A partir de los cuales se puede definir la relación entre las ecuaciones (2.42) y (2.43) como [47] [48]:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k \quad (2.45)$$

Donde A es la matriz que relaciona las variables de estado para un instante de tiempo t_k con t_{k+1} definida como [50], [57]:

$$A = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & M_n \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

M_i Se define como [49]:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(h \cdot \omega \cdot T_s) & -\sin(h \cdot \omega \cdot T_s) \\ \sin(h \cdot \omega \cdot T_s) & \cos(h \cdot \omega \cdot T_s) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

En consecuencia, la medición en el instante k puede ser relacionada con las variables de estado en el instante $k+1$, como [49], [50], [56]:

$$y_{k+1} = H \cdot x_{k+1} \quad (2.48)$$

Donde H es la matriz que expresa la relación ideal entre la medición y el vector de estado en el tiempo t_k .

$$H = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad 0] \quad (2.49)$$

La varianza de ruido R puede ser seleccionada como un valor constante. Esto basado en la variación del ruido de fondo en las mediciones de campo. La matriz de covarianza Q se selecciona para ser una matriz diagonal [58].

El modelo descrito también puede proporcionar la información de la amplitud de la señal $V_h(t)$ de y_k y el ángulo de fase, $\theta_h(t) = h \cdot \omega \cdot t + \varphi_i$ donde [50], [51]:

$$V_i(k) = \sqrt{x_{2 \cdot i}^2 + x_{2 \cdot i + 1}^2} \quad (2.50)$$

$$\theta(k) = \tan^{-1}(x_{2 \cdot i + 1} / x_{2 \cdot i}) \quad (2.51)$$

En la Figura 2.30 se puede observar la estructura a utilizar para el cálculo de la señal de referencia con el algoritmo de Kalman el cual es utilizado para estimar las amplitudes y ángulos de fase de cada componente armónica de una señal [57]. Estas componentes armónicas se utilizan para establecer la presencia de una perturbación de tensión comparando los valores medidos con los valores de operación establecidos. Los huecos o elevaciones de tensión, se detectan mediante la tensión de red de componente armónica fundamental, los cuales pueden ser compensados de acuerdo a la estrategia de compensación implementada. Las amplitudes de las otras componentes armónicas de tensión medidas sirven para determinar la presencia de distorsión armónica a ser compensada.

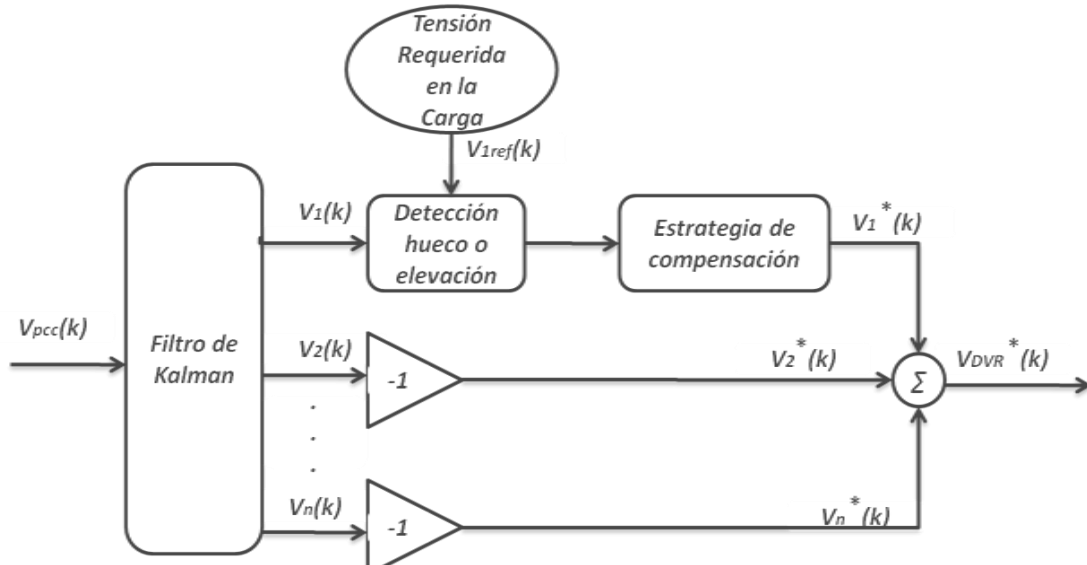


Figura 2.30. Cálculo de la señal de referencia monofásica

2.4.2. Transformada de Park o DQ0

La transformación de Park tiene por objetivo convertir los valores instantáneos de un sistema trifásicos (sistema de referencia natural abc), a un sistema de referencia de valores constantes en régimen permanente (sistema de referencia dq0) [59]. Esta transformación se apoya en el concepto de la transformada de Clarke que permite expresar las variables f_{abc} en un sistema coordinado equivalente de ejes estacionarios $f_{\alpha\beta 0}$. La expresión para este cambio de coordenadas es [60]:

$$f_{\alpha\beta 0} = P \cdot f_{abc} \quad (2.52)$$

Donde el vector $f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$ consta de las componentes escalares asociadas a las tres fases, las cuales varían en el tiempo en forma sinusoidal. El vector $f_{\alpha\beta 0} = [f_\alpha \ f_\beta \ f_0]^T$ corresponde a la representación del vector f_{abc} en el sistema coordinado α - β -0, y donde las componentes f_α y f_β también varían de forma sinusoidal en el tiempo y están en cuadratura. La matriz de transformación P está definida por [60]:

$$P = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

A partir de este resultado se puede deducir que una tensión trifásica equilibrada y sinusoidal pura sigue una trayectoria circular de radio $\rho = V_{max} \cdot \sqrt{3/2}$ y velocidad angular constante ω sobre el plano $\alpha - \beta$, tal y como muestra la Figura 2.31 [61].

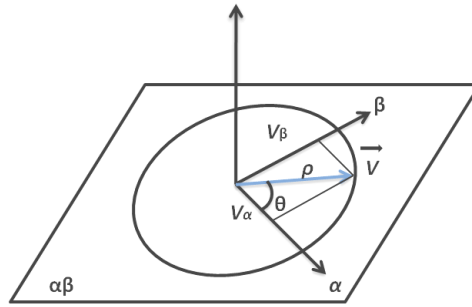


Figura 2.31. Transformación abc a α - β -0

Ahora bien, si al marco estacionario α - β -0 se le permite girar a cierta velocidad de rotación ω , se obtiene la transformación de Park en un nuevo sistema coordenado rotatorio también en cuadratura. El cambio de coordenadas queda definido según la ecuación de transformación [60]:

$$f_{dq0} = T \cdot f_{\alpha\beta0} \quad (2.54)$$

La expresión de la matriz T se define como:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \sin(\theta(t)) & 0 \\ -\sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Siendo:

$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta_0$: ángulo de rotación de los ejes d – q.

$\theta_0 = \theta(0)$: ángulo inicial entre los ejes d – q y el vector espacial de referencia.

$\omega = 2 * \pi * f$: velocidad angular de los ejes d – q.

Por tal razón la transformada de Park se puede definir como una matriz ortogonal que surge a partir de la combinación de la transformada de Clarke y la transformación del marco de referencia α - β -0 al sistema dq0, el cual permite el cambio directo del sistema f_{abc} a f_{dq0} como se muestra en la Figura 2.32 la expresión para la transformada de Park se define como: [61].

$$f_{dq0} = T \cdot f_{abc} \quad (2.56)$$

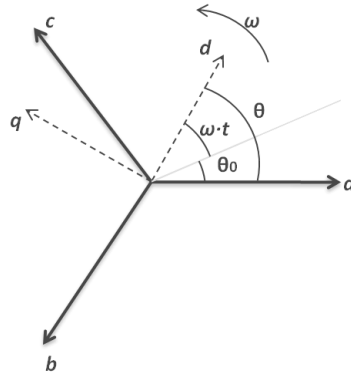


Figura 2.32. Sistema de referencia trifásico y DQ0.

La expresión para la matriz de transformación T queda expresado como:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Al aplicar la transformación de DQ0 a un sistema de tensiones trifásicas equilibradas expresadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{an} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \\ V_b &= V_{bn} \cdot \cos \left(\omega \cdot t + \varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_c &= V_{cn} \cdot \cos \left(\omega \cdot t + \varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Siendo $V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = V_{fase}$, se obtiene los siguientes valores para las componentes DQ0.

$$f_d = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{fase}}{\sqrt{2}} = V_{linea\ RMS} \quad f_q = 0 \quad f_0 = 0 \quad (2.59)$$

De la ecuación (2.59) se pueden deducir los valores de referencia que deben ser tenidos en cuenta para la compensación, es decir, si al aplicar la transformación DQ0 a un sistema trifásico los valores de las componentes f_d , f_q o f_0 , no corresponden a estos, es necesario adicionar una señal de compensación la cual será igual al valor de referencia menos el valor de cada

componente estimada, como se puede observar en la Figura 2.33 que ilustra el esquema para el cálculo de las señales de referencia a compensar por el DVR.

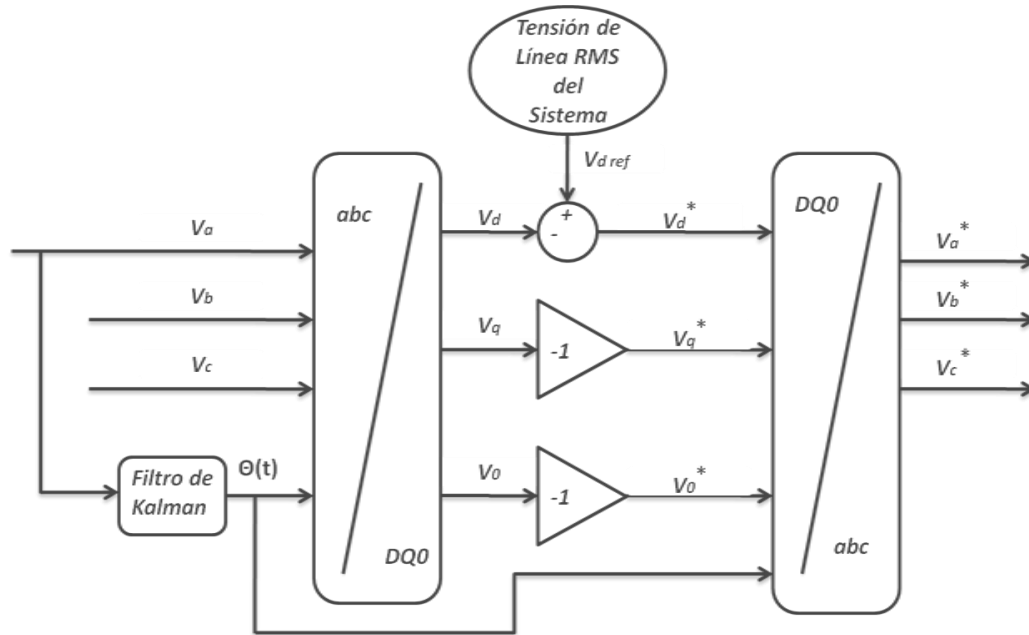


Figura 2.33. Cálculo de la señal de referencia para el DVR aplicando la transformación DQ0.

Donde V_a^*, V_b^*, V_c^* corresponde a las señales a compensar por fase, las cuales resultan de aplicar la transformación inversa Park de las señales V_d^*, V_q^*, V_0^* según la siguiente ecuación:

$$f_{abc} = T^t \cdot f_{dq0} \quad (2.60)$$

Siendo T^t la matriz traspuesta de T expresada en la ecuación (2.57).

2.5. Control del Convertidor DC/AC

Las técnicas de control en el convertidor del DVR están basadas en teorías de control clásico y teorías de control moderno. Estas se pueden clasificar principalmente en dos grandes grupos: técnicas de lazo abierto y técnicas de lazo cerrado. Las técnicas de lazo abierto tienen como objeto realizar un control de la tensión de salida del convertidor a partir de una señal de referencia y se basan en el cálculo de los tiempos de encendido y apagado de cada interruptor para que la señal de salida siga la señal de referencia. Las técnicas de lazo cerrado se utilizan para mantener la salida del sistema cercana a una señal de referencia deseada, se aplican principalmente cuando existen incertidumbres en el sistema a regular, cuando este varía con el tiempo o cuando existen perturbaciones externas al sistema [56].

Es importante destacar que las técnicas de lazo cerrado son las que más se utilizan en el control de tensión del convertidor, sin embargo algunas de estas técnicas requieren del uso de una técnica de lazo abierto para sintetizar finalmente las señales de conmutación de los interruptores [55], [61].

Las principales técnicas de control implementadas en el DVR se resumen y clasifican en la Figura 2.34 [62]:

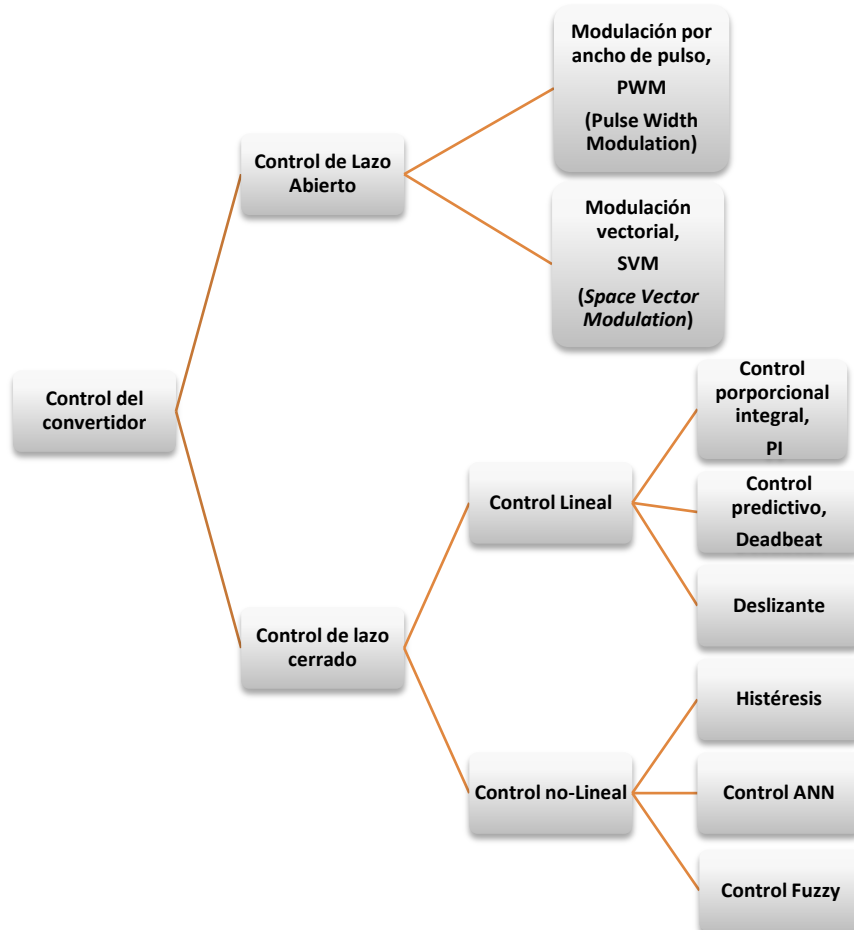


Figura 2.34. Estrategias de control para el convertidor DC/AC en el DVR

En [62] se hace una revisión de las principales propuestas de estrategias de control lineal y no lineal en lazo cerrado, con el objetivo de dar al DVR mayor versatilidad ante variación de parámetros como cambios en el punto de operación, representados por cambios de carga, compensación de huecos o elevaciones de tensión y por cambios en la distorsión armónica de la fuente de alimentación [17]. En [64-67] se propone el control de histéresis que presenta buena respuesta, aunque con limitantes como altas frecuencia de conmutación que pueden llegarse a generar y por tanto difícil de seguir por los dispositivos de conmutación. En [68-70] se propone y verifica la efectividad del control en modo deslizante representada en una buena respuesta dinámica, robustez y estabilidad ante fuertes variaciones en la carga y fuente de alimentación. En [71], [72] se estudia el control predictivo Deadbeat que también presenta buena respuesta, aunque se debe tener un conocimiento previo de los parámetros del sistema. Además de las

estrategias anteriores se han propuesto otras estrategias como el control ANN (por sus siglas en inglés Artificial Neural Network) [73], control fuzzy [74], control de espacio vectorial [75], [76].

Este proyecto se enfoca en el estudio de dos técnicas de control convencional como lo son el control PI e histéresis y una técnica más avanzada denominada Deadbeat, las cuales se analizan en mayor detalle a continuación.

2.5.1. Control de histéresis

El principio del control por histéresis en el DVR consiste en mantener la tensión de salida del V_{DVR} dentro de unos límites de variación permitidos definidos por una banda de histéresis alrededor de la tensión de referencia V_{ref} [62-65]. El límite superior V_{sup} y el límite inferior V_{inf} se definen como:

$$V_{sup} = V_{ref} + h \quad (2.61)$$

$$V_{inf} = V_{ref} - h \quad (2.62)$$

Donde h es la banda de histéresis.

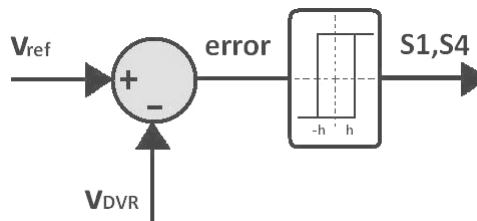


Figura 2.35. Control por banda de histéresis

El principio de operación del control de histéresis (ver Figura 2.35), para el caso monofásico del DVR con convertidor en puente completo (ver Figura 2.36), funciona de la siguiente manera:

$$Si V_{DVR} > V_{ref} + h \quad S_1, S_2: O_{ff}, \quad S_3, S_4: O_n \quad (2.63)$$

$$Si V_{DVR} < V_{ref} - h \quad S_1, S_2: O_n, \quad S_3, S_4: O_{ff} \quad (2.64)$$

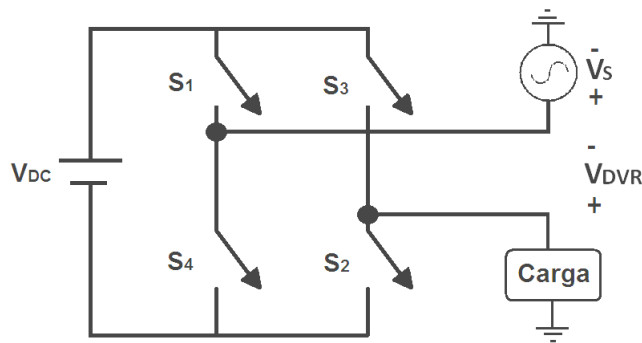


Figura 2.36. Inversor monofásico en puente completo.

La Figura 2.37 muestra un ejemplo de control de histéresis con $h = \pm 0,5 V$. En esta se presenta una señal denotada como V_{ref} que corresponde a la señal de referencia que debe ser generada por el convertidor y también una banda superior $V_{ref} + h$ y otra banda inferior $V_{ref} - h$ que representan los límites entre los cuales debe ser mantenida la señal a la salida del DVR (V_{DVR}). De igual manera se presenta las señales de conmutación para los interruptores (S1-S4), las cuales permiten realizar el cambio en la pendiente de la señal inyectada por el DVR con el fin de mantenerla dentro la banda definida.

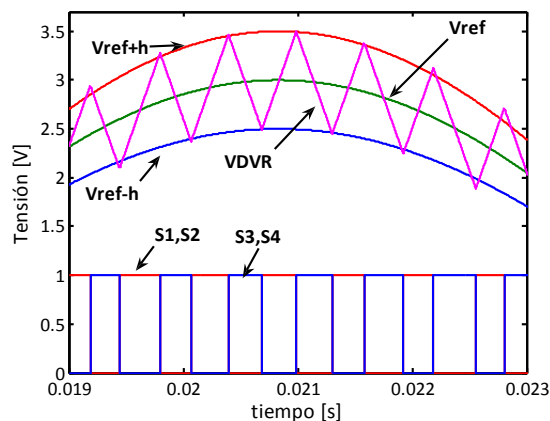


Figura 2.37. Control de histéresis con $h=\pm 0,5V$.

Esta técnica es de fácil implementación y permite obtener errores pequeños con la disminución del ancho de la banda de histéresis. La desventaja de esta técnica es que puede alcanzar elevadas frecuencias de conmutación tales que los actuadores convencionales no podrán seguir [56], [63].

2.5.2. Control PI

Este regulador se utiliza para estimar la tensión exacta que lleva el error de seguimiento de la señal de referencia a un valor nulo. Una vez calculadas las señales de control del convertidor para seguir la tensión de referencia. Calculadas las tensiones de control, se sintetizan mediante

cualquier técnica de control en lazo abierto, siendo la basada en PWM una de las más usadas (ver Figura 2.38) [56].

La estimación de la tensión se hace por medio de dos acciones, una proporcional y una integral. La acción del control proporcional se define mediante la siguiente ecuación:

$$u_{inv}(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad (2.65)$$

Aplicando la ecuación anterior a las variables a controlar en el DVR:

$$u_{inv}(t) = K_p \cdot (V_{ref} - V_{DVR}) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t (V_{ref} - V_{DVR}) \cdot d\tau \quad (2.66)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral. El esquema de control del controlador PI se puede observar en la Figura 2.38 [56].

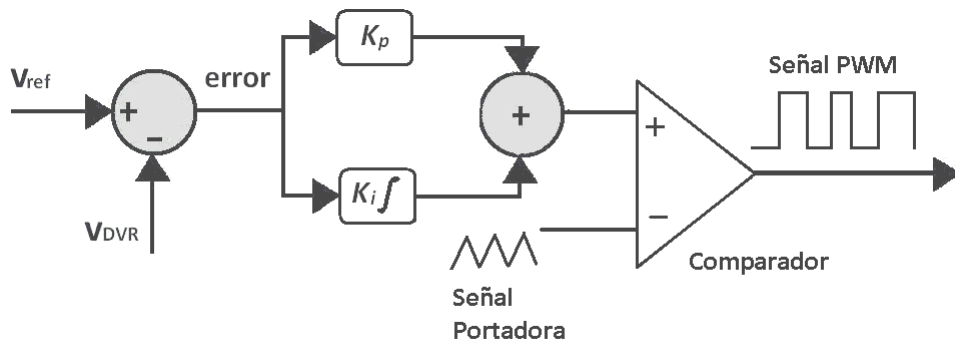


Figura 2.38. Controlador PI aplicado al control de tensión en el DVR.

El proceso de ajuste de las constantes del controlador PI debe ir acompañado de un análisis completo del sistema a controlar, siendo de gran utilidad realizar simulaciones que incluyan el DVR y el sistema al que se va conectar[56].

Para realizar el análisis del sistema del DVR con el controlador PI primero es necesario deducir la función de transferencia del DVR en lazo abierto y posteriormente se debe obtener la función de transferencia en lazo cerrado incluyendo el controlador PI.

El circuito de la Figura 2.39 representa el modelo monofásico del DVR donde R_f representa la resistencia del filtro, L_f la bobina del filtro, C_f el condensador del filtro, m es el índice de modulación y V_{dc} es la tensión en la barra de continua [17].

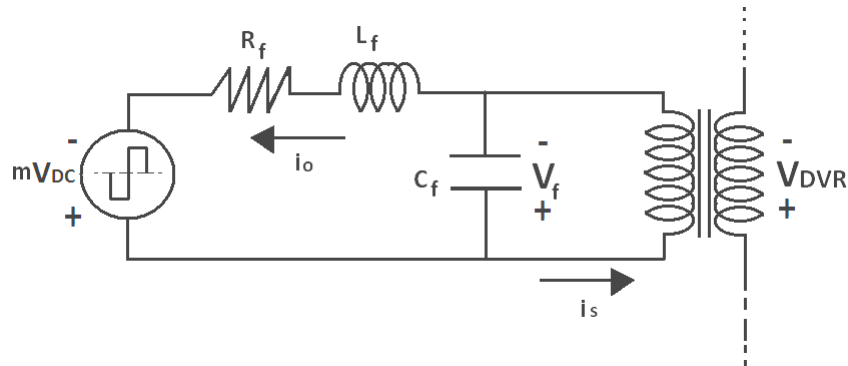


Figura 2.39. Modelo monofásico del DVR con filtro RLC.

La función de transferencia en lazo abierto es:

$$G(s) = \frac{V_f}{m} = \frac{V_{dc}/(L_f \cdot C_f)}{s^2 + \left(\frac{R_f \cdot C_f \cdot Z + L_f}{Z \cdot L_f \cdot C_f}\right) \cdot s + \frac{R_f + Z}{Z \cdot L_f \cdot C_f}} \quad (2.67)$$

Donde Z se define como:

$$Z = \frac{V_f}{I_s} \quad (2.68)$$

Para el controlador la función de transferencia se define como:

$$C(s) = K_p \left(\frac{s \cdot T_i + 1}{T_i \cdot s} \right) \quad (2.69)$$

La función de transferencia en lazo cerrado del DVR con el controlador PI es:

$$H(s) = \frac{\frac{V_{dc} \cdot K_p}{L_f \cdot C_f} \cdot s + \frac{V_{dc} \cdot K_p}{T_i \cdot L_f \cdot C_f}}{s^3 + \left(\frac{R_f \cdot C_f \cdot Z + L_f}{Z \cdot L_f \cdot C_f}\right) \cdot s^2 + \left(\frac{R_f + Z + V_{dc} \cdot K_p \cdot Z}{Z \cdot L_f \cdot C_f}\right) \cdot s + \frac{V_{dc} \cdot K_p}{T_i \cdot L_f \cdot C_f}} \quad (2.70)$$

Aplicando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz se pueden obtener las restricciones de estabilidad para el controlador PI del DVR [17]:

$$K_p > 0 \quad (2.71)$$

$$Z > -\frac{L_f}{R_f \cdot C_f} \quad (2.72)$$

$$(R_f \cdot C_f + R_f \cdot C_f \cdot V_{dc} \cdot K_p - L_f^2 \cdot C_f^2 \cdot V_{dc} \cdot K_p) \cdot Z^2$$

$$+(R_f^2 \cdot C_f + L_f + L_f \cdot V_{dc} \cdot K_P) \cdot Z + L_f \cdot R_f > 0 \quad (2.73)$$

2.5.3. Control Deadbeat

El Deadbeat es una estrategia de control de sistemas discretos, la cual tiene por objetivo predecir con base en el modelo del sistema a controlar, el valor que debe tener la señal generada por el convertidor, de tal manera que la tensión generada alcance el valor de referencia en el menor número de períodos de muestreo [56],[63].

Esta técnica puede ser sensible a las incertidumbres presentes en la estimación del modelo del sistema, además los algoritmos pueden ser computacionalmente intensivos y por tanto requerir alta capacidad de procesamiento. Sin embargo, por estar basado en el modelo del sistema a controlar, el control Deadbeat ofrece una respuesta dinámica más rápida que las técnicas de control convencionales y puede ser aplicada de forma satisfactoria a circuitos de conmutación [77].

En el análisis del control Deadbeat aplicado al DVR se considera el modelo equivalente mostrado en la Figura 2.40

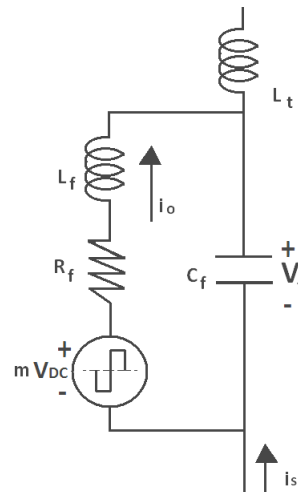


Figura 2.40. Circuito equivalente del DVR con filtro RLC.

Para el cual se construye el modelo de espacio de estados con $x^T = [V_f \ i_0]$ [71-72], por tanto:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot z \quad (2.74)$$

Donde

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/C_f \\ -1/L_f & -R_f/L_f \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & -1/C_f \\ V_{dc}/L_f & 0 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

$$Y \quad z^T = [u \ i_s].$$

Al discretizar la ecuación 2.74 se obtiene:

$$x(k + 1) = F \cdot x(k) + G \cdot z(k) \quad (2.76)$$

Donde las matrices F y G están dadas por [72]:

$$F = e^{A \cdot T_s} \quad y \quad G = \int_0^{T_s} e^{A \cdot t} \cdot B \cdot dt \quad (2.77)$$

Siendo T_s el tiempo de muestreo.

La matriz exponencial $e^{A \cdot T_s}$ se define como [78]:

$$e^{A \cdot T_s} = I + A \cdot T_s + \frac{1}{2!} \cdot A^2 \cdot T_s^2 + \dots + \frac{1}{k!} \cdot A^k \cdot T_s^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^k \cdot T_s^k}{k!} \quad (2.78)$$

El error introducido por la discretización puede hacerse despreciable mediante la utilización de tiempos de muestreo lo suficientemente pequeños, con lo cual truncar la serie hasta un cuarto termino garantiza una buena aproximación de la misma.

La matriz G se puede definir como [78]:

$$G = (e^{A \cdot T_s} - I) \cdot A^{-1} \cdot B \quad (2.79)$$

Siempre y cuando la matriz A sea no singular.

Definiendo los elementos de la matriz F como f_{ij} y de la matriz G como g_{ij} de la ecuación 2.77 se puede escribir:

$$v_f(k + 1) = f_{11} \cdot v_f(k) + f_{12} \cdot i_o(k) + g_{11} \cdot m(k) + g_{12} \cdot i_s(k) \quad (2.80)$$

$$i_o(k + 1) = f_{21} \cdot v_f(k) + f_{22} \cdot i_o(k) + g_{21} \cdot m(k) + g_{22} \cdot i_s(k) \quad (2.81)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores para $v_f(k + 1)$ se obtiene:

$$\begin{aligned} v_f(k + 1) = & (f_{11} + f_{22}) \cdot v_f(k) - (f_{11} \cdot f_{22} - f_{12} \cdot f_{21}) \cdot v_f(k - 1) \\ & + (f_{12} \cdot g_{21} - f_{22} \cdot g_{11}) \cdot m(k - 1) + g_{11} \cdot m(k) \\ & + (f_{12} \cdot g_{22} - f_{22} \cdot g_{12}) \cdot i_s(k - 1) + g_{12} \cdot i_s(k). \end{aligned} \quad (2.82)$$

En el control Deadbeat se define una función de costo de la forma [56], [71], [72]:

$$J = (v_f(k + 1) - v_{ref}(k + 1))^2 \quad (2.83)$$

Al minimizar la función J con respecto a m se debe cumplir:

$$\frac{\partial J}{\partial m(k)} = 0 \quad (2.84)$$

Como la señal de referencia no depende de la salida del controlador, $\frac{\partial v_{ref}(k+1)}{\partial m(k)} = 0$ por tanto:

$$\frac{\partial J}{\partial m(k)} = 2 \cdot (v_f(k+1) - v_{ref}(k+1)) \frac{\partial v_f(k+1)}{\partial m(k)} = 0 \quad (2.85)$$

Reemplazando la ecuación 2.82 en 2.85 y despejando $u(k)$ se obtiene:

$$m(k) = \frac{v_{ref}(k+1) - (f_{11} + f_{22}) \cdot v_f(k) + (f_{11} \cdot f_{22} - f_{12} \cdot f_{21}) \cdot v_f(k-1)}{g_{11}} - \frac{(f_{12} \cdot g_{21} - f_{22} \cdot g_{11}) \cdot m(k-1)}{g_{11}} - \frac{(f_{12} \cdot g_{22} - f_{22} \cdot g_{12}) \cdot i_s(k-1)}{g_{11}} - \frac{g_{12} \cdot i_s(k)}{g_{11}} \quad (2.86)$$

La señal de conmutación del convertidor se puede sintetizar mediante la aplicación de técnicas como modulación por ancho de pulso PWM (ver Figura 2.41) [71], [72], [79].

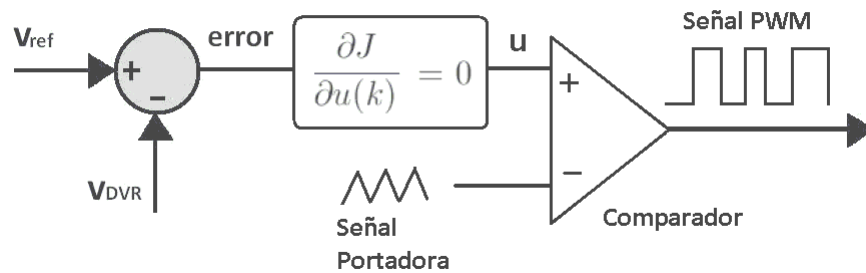


Figura 2.41. Controlador predictivo Deadbeat aplicado al control de tensión en el DVR.

3. Parámetros y consideraciones de los modelos

Dentro de este capítulo se establecen las especificaciones técnicas y consideraciones que se tomaron en cuenta para la simulación de cada uno de los modelos del DVR en operación en un sistema de distribución. Estas especificaciones incluyen: nivel de tensión de conexión del DVR, carga a proteger, así como cada una de las componentes del DVR que se estudiaron en el Capítulo 2.

Tensión nominal del sistema y carga a proteger

La potencia de la carga a proteger por el DVR se toma de los datos de la monitorización realizada al transformador B del Centro de Tecnologías de Información y Comunicación “CENTIC” de la Universidad Industrial de Santander. Las características principales de este transformador y los datos de monitorización se encuentran en [80]. En la Tabla 3.1 se resumen los datos de interés.

Relación Transformación	13200/(216-124,7) [V]
Potencia nominal	500 kVA
Uz	3,90%
Potencia máxima registrada	160kVA
Factor de potencia registrado	0,8 atraso

Tabla 3.1. Datos del transformador B del CENTIC.

De acuerdo a los datos anteriores se selecciona una carga trifásica de 160 kVA con fp de 0,8 en atraso. El nivel de tensión de conexión del DVR se escoge de 13,2 kV teniendo en cuenta que las principales investigaciones y desarrollos comerciales del DVR, trabajan a niveles de media tensión tal y como se reporta en [81].

La carga se considera lineal y se simula como impedancia constante, por tanto de acuerdo a la potencia y al nivel de tensión seleccionada, se obtiene una impedancia referida al lado de alta:

$$Z_Y = 871,2 + j653,4010 [\Omega] \quad (3.1)$$

Filtro pasivo y transformador de acoplamiento

En el diseño del filtro pasivo RLC se debe tener en cuenta que:

- Las señales de tensión a compensar pueden tener armónicos de orden 5 y 7 con respecto a la fundamental, por tanto la atenuación del filtro en frecuencias de 300 Hz y 420 Hz no debe ser considerable.
- Se deben seleccionar valores de L_f y C_f que no incrementen la capacidad nominal de corriente del convertidor considerablemente.
- El valor de R_f debe ser baja, con el fin de reducir las pérdidas de potencia activa en el filtro.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, en el proceso de diseño del filtro se debe tener en cuenta la corriente del convertidor definida como I_0 en la Figura 2.39, la cual se puede expresar como:

$$I_0(s) = \frac{V_{inv}(s) \cdot s \cdot C_f}{s^2 \cdot L_f \cdot C_f + s \cdot C_f \cdot R_f + 1} + \frac{I_S(s)}{s^2 \cdot L_f \cdot C_f + s \cdot C_f \cdot R_f + 1} \quad (3.2)$$

Donde:

V_{inv} es la tensión a la salida del convertidor y se puede expresar como:

$$V_{inv} = u \cdot V_{DC} \quad (3.3)$$

V_{DC} es la tensión en la barra de continua y es seleccionada de acuerdo a la siguiente ecuación, según los criterios especificados en [29]:

$$V_{DC} = 3 \cdot V_{maxDVR} / \sqrt{2} \quad (3.4)$$

V_{maxDVR} representa la máxima tensión inyectada por el transformador de acoplamiento del DVR en el lado del convertidor es decir:

$$V_{maxDVR} = V_{fase} \cdot \varepsilon_{m\acute{a}x} / n \quad (3.5)$$

Siendo n la relación de transformación, $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ el hueco de tensión máximo a compensar en p.u (0,9 en p.u. para el caso del DVR) y V_{fase} la tensión entre línea y tierra del sistema a compensar en valor RMS.

I_S representa la corriente nominal de la carga (I_L) en lado del convertidor o baja tensión del transformador de acoplamiento, por tanto:

$$I_S = I_L \cdot n \quad (3.6)$$

Analizando las ecuaciones anteriores se puede deducir que al incrementar la relación de transformación se reduce la tensión en la barra de continua, pero a su vez se puede aumentar considerablemente la corriente en el lado baja tensión del transformador, por tanto se debe seleccionar una relación donde se pueda obtener un equilibrio entre estas y garantizar la mínima corriente en el convertidor.

La relación de transformación y los parámetros finales del filtro se seleccionan teniendo en cuenta el diagrama de flujo de la Figura 3.1 que permite calcular la corriente del convertidor a la frecuencia de 60 Hz para diferentes valores de relación de transformación n y del condensador del filtro C_f .

En este diagrama la bobina del filtro se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L_f = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_f} \quad (3.7)$$

A manera de ejemplo se puede diseñar el filtro para una frecuencia de sintonización $\omega = 2 \cdot \pi \cdot (250 \text{ Hz})$ [rad/s].

El valor para R_f se asume de 0,01 [Ω] que representa la resistencia asociada a la bobina L_f .

La corriente del inversor I_0 , la tensión de continua V_{DC} y la corriente de carga en el lado del convertidor I_s se calculan de acuerdo a las ecuaciones (3.2), (3.4) y (3.6) respectivamente.

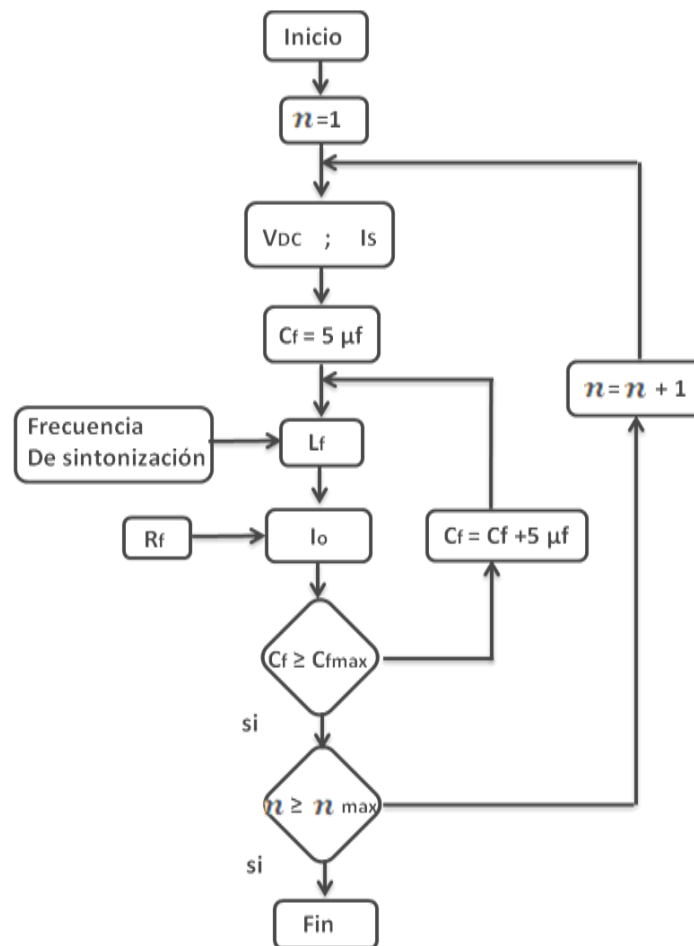


Figura 3. 1. Diagrama de flujo para selección de parámetros del filtro RLC.

Al aplicar el diagrama de flujo se obtienen las curvas para I_0 mostradas en la Figura 3.2, de donde se selecciona un valor identificado sobre la figura por el punto de color verde, para un condensador de $100\mu F$, una relación de transformación de $n = 10$ y con la cual se estima una corriente en el convertidor $I_0 \approx 76 \text{ A}$.

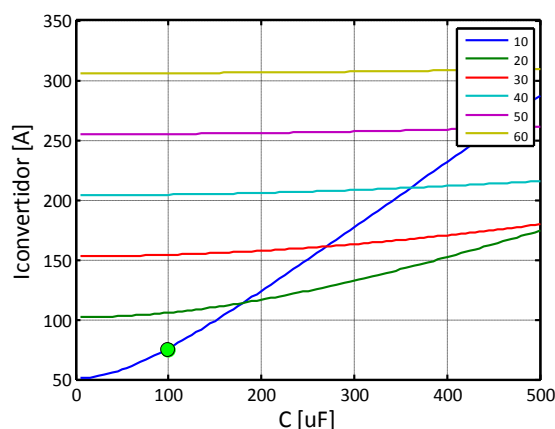


Figura 3.2. Corriente del convertidor para diferentes valores de C_f y n .

Es importante tener en cuenta que al seleccionar un valor de capacitancia menor para el condensador se puede comprometer el seguimiento de la señal de referencia por parte del convertidor.

Ya seleccionado el valor del condensador se calcula el valor de L_f :

$$L_f = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_f} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 250)^2 \cdot 100^{-6}} = 4,1 \text{ mH} \quad (3.8)$$

Con los valores de L_f y C_f se puede obtener el diagrama de bode para el filtro seleccionado con lo muestra la Figura 3.3.

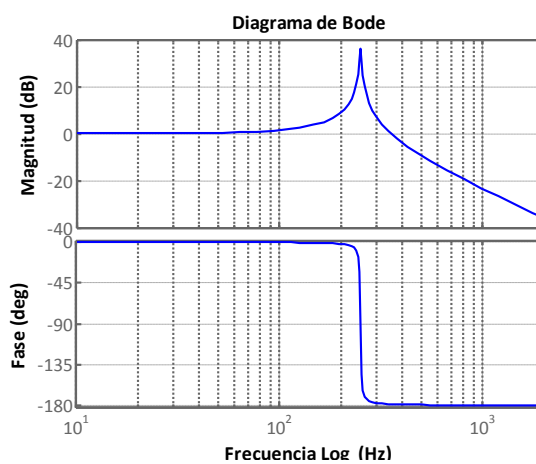


Figura 3.3. Diagrama de Bode para filtro RLC seleccionado.

Para mejorar la respuesta transitoria del filtro es necesario utilizar una resistencia de conexión en el inicio y final de la compensación del DVR, con un tiempo de conexión de aproximadamente 5 [ms]. Esta resistencia se toma de 2,5 [Ω] para efectos prácticos en la simulación.

En la Figura 3.4 se muestra la respuesta transitoria del filtro con y sin resistencia de conexión como respuesta al escalón unitario.

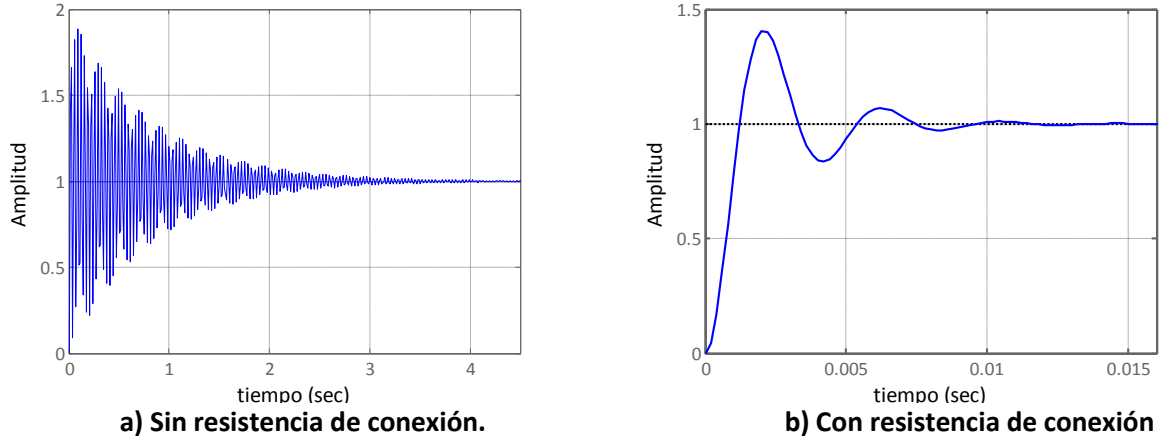


Figura 3.4. Respuesta al escalón unitario filtro RLC.

Seleccionada la relación de transformación, la potencia nominal del transformador de acoplamiento con filtro RLC en el lado del convertidor se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{trafo3\phi} = \varepsilon_{m\acute{a}x} \cdot S_{L3\phi} \quad (3.9)$$

Siendo $S_{L3\phi}$ la potencia nominal de la carga.

$$S_{trafo3\phi} = 0,9 \cdot 160 = 144kVA \quad (3.10)$$

Por tanto:

$$S_{trafo1\phi} = \frac{144kVA}{3} = 48kVA \quad (3.11)$$

Se eligen tres transformadores monofásicos cada uno con las características dadas en la Tabla 3.2.

Tensión Primaria	13200[V]
Tensión Secundaria	1320[V]
Potencia	50kVA
Uz	3%
Frecuencia	60 Hz

Tabla 3.2. Datos del transformador del DVR con filtro RLC

Para el cálculo del condensador del filtro en el lado de la línea de acuerdo al circuito equivalente de la Figura 2.13 es necesario tener en cuenta los datos del transformador como condición inicial y necesaria para el diseño.

El valor de R_T debe ser baja, con el fin de reducir las pérdidas de potencia activa en el transformador, por tanto el valor de la resistencia equivalente referida al lado de alta del transformador es de 2 $[\Omega]$. El valor de L_T es calculado para obtener una impedancia de corto circuito del 3%, con el cual se obtiene $L_T = 96 [mH]$ referida al lado de alta del transformador.

Ya definido el valor de la bobina del transformador se calcula el valor de C_f despejando de la ecuación (3.7), para una frecuencia de sintonización $\omega = 2 \cdot \pi \cdot (250 \text{ Hz}) [rad/s]$. El valor de $C_f = 4,4 \mu F$.

Para este caso la corriente del transformador en el lado de baja es igual a la corriente por el convertidor (I_0), por lo cual es necesario realizar un dimensionamiento diferente al del transformador expuesto para el filtro RLC. Para calcular la potencia nominal del transformador se utiliza la siguiente expresión:

$$S_{trafo1\phi} = \left(I_0/n \right) \cdot V_{maxDVR} \quad (3.12)$$

El valor de la relación de transformación se selecciona de 10 para reducir la tensión en la barra de continua y evitar altas corrientes en el convertidor. El valor de I_0 y V_{maxDVR} se calculan de las ecuaciones (3.2) y (3.5) respectivamente.

Para el DVR con filtro capacitivo se eligen tres transformadores monofásicos cada uno con las características dadas en la Tabla 3.3.

Tensión Primaria	13200[V]
Tensión Secundaria	1320[V]
Potencia	70kVA
Uz	3%
Frecuencia	60 Hz

Tabla 3.3. Datos del transformador del DVR con filtro C.

Convertidor de DC/AC

La topología utilizada en el convertidor para el caso monofásico es un puente completo y para el caso trifásico tres puentes completos uno por cada fase, seleccionado así de acuerdo a las ventajas que presentan estas topologías⁵.

La técnica de control seleccionada para el control del convertidor en las simulaciones del Capítulo 4 corresponde al control predictivo Deadbeat debido a su rapidez y buena respuesta en el seguimiento de la señal de referencia.

⁵ Ver sección 2.2.2

Unidad de almacenamiento de energía

La topología seleccionada para la unidad de almacenamiento, es la mostrada en la Figura 2.3, debido a que en esta topología no se ven limitadas las opciones de compensación a un determinado nivel o a un tiempo máximo de compensación. Para las simulaciones el almacenador de energía es representada por una fuente ideal de tensión en DC de valor igual a 1500 V, la cual suministra potencia activa al condensador de la barra de continua para mantener el nivel de tensión en un rango en el cual las opciones de compensación del DVR no se vean afectadas (-20% y 5% de V_{DC}).

El valor de para la tensión en la barra de continua es calculado a partir de la ecuación (3.4), como:

$$V_{DC} = 3 \cdot ((0.9 \cdot 7621)/10)/\sqrt{2} = 1454,99 V \approx 1500 V \quad (3.13)$$

Para el control de la tensión en la barra de continua se utiliza en la simulación un control proporcional el cual calcula el error entre la tensión medida en los bornes del condensador de la barra de continua y la tensión nominal de la barra de continua definida en la ecuación (3.13). Cuando el error es inferior al umbral (es decir cuando la tensión del condensador es menor a $0,8$ de V_{DC}) el condensador es conectado al almacenador de energía hasta restaurar su valor de tensión al nominal. De otro forma, cuando el error supera el umbral es conectada una resistencia a la barra de continua, la cual realiza descargas controladas del condensador manteniendo su valor en tensión menor al máximo permitido.

El condensador de la barra de continua utilizado para las simulaciones es de $10000 \mu F$, ya que permite ver la variación de la tensión en la barra de continua durante la compensación de la perturbación de tensión.

La Figura 3.5 muestra el circuito de potencia equivalente utilizado en la barra de continua.

Donde:

V_{AE} = Tensión en el almacenador de energía.

C_{DC} = EL condensador de la barra de continua.

S_c = Representa la señal de conmutación para carga del condensador DC.

S_d = Representa la señal de conmutación para descarga del condensador DC.

R_c = La resistencia para carga del condensador igual $0,1 [\Omega]$.

L_c = La bobina para carga del condensador igual $150 [mH]$.

R_d = La resistencia para descarga del condensador igual $0,1 [\Omega]$.

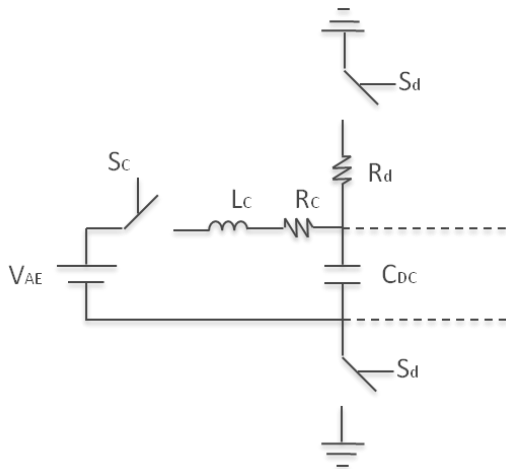


Figura 3.5. Circuito equivalente para la barra de continua.

3.1. Modelos de simulación

Acorde a lo expuesto en el capítulo 2 y las consideraciones presentadas en cuanto a componentes, topologías y las diferentes estrategias a utilizar se definen a continuación los modelos con los cuales se representaran el funcionamiento y las opciones de compensación del DVR.

La selección de los modelos a utilizar en el proyecto se realizó e acuerdo a simulaciones realizadas previamente, en las cuales se estudian las diferentes combinaciones posibles entre técnicas de control en el convertidor, filtrado y estrategia de compensación, eligiendo para el proyecto los modelos en cuales se pueden analizar las características más relevantes en cuanto a opciones y capacidad de compensación.

Los esquemas de control y los circuitos de potencia para los modelos monofásicos y trifásicos se muestran en las figuras 3.6 y 3.7, respectivamente.

Para la Figura 3.6, se tiene que:

θ_1 = Ángulo de fase de la componente armónica fundamental.

θ_{1pre} = Ángulo de fase de la componente armónica fundamental antes de la perturbación.

θ_n = Ángulo de fase de la componente armónica n , para $n = 2, 3, 4 \dots$

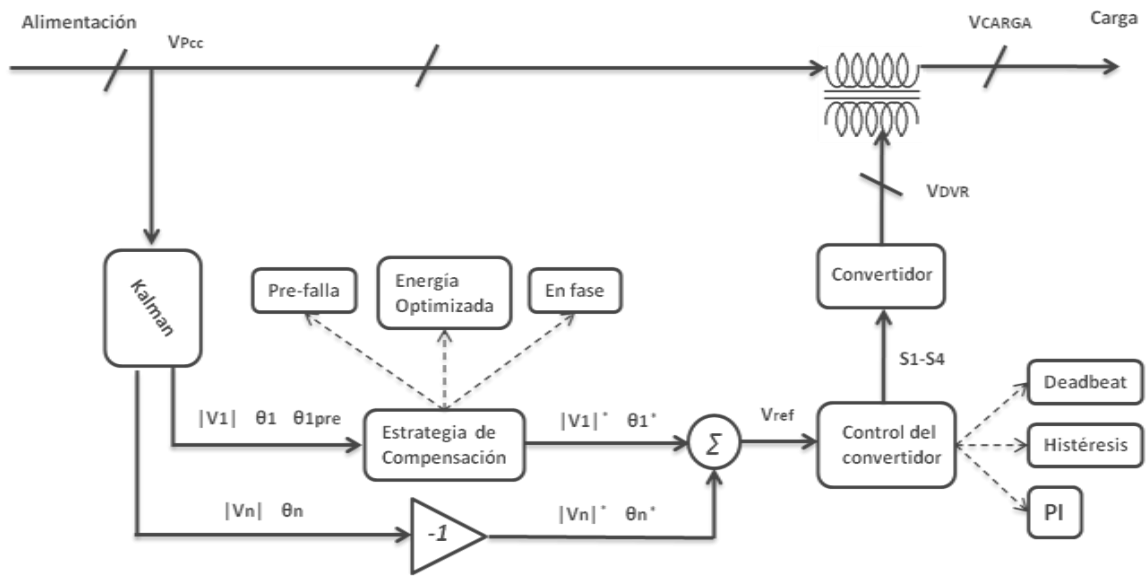
$|V_1|$ = Magnitud de la componente armónica fundamental.

$|V_n|$ = Magnitud de la componente armónica n .

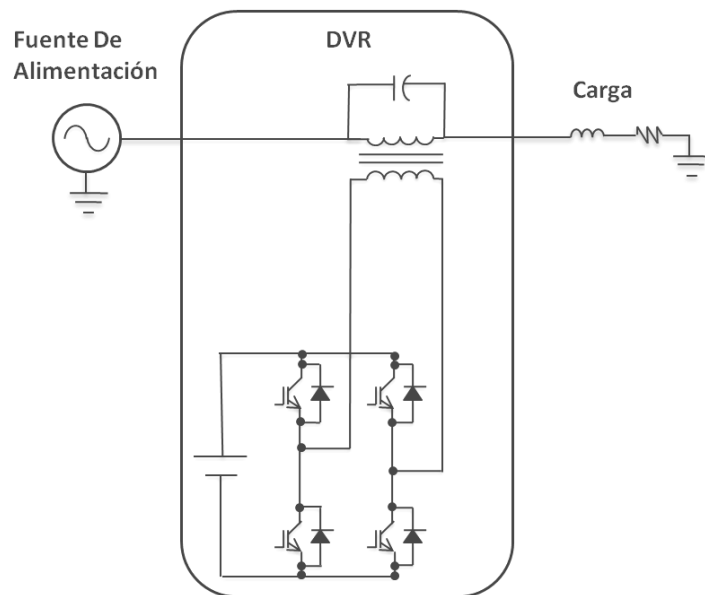
$S_1 - S_4$ = Señales de conmutación para el convertidor monofásico.

θ_n^* = Ángulo de fase de la señal de compensación de la componente armónica n , para $n = 1, 2, 3 \dots$

$|V_n|^*$ = Magnitud de la señal de compensación de la componente armónica n .



a) Esquema de control.



b) Circuito de potencia.

Figura 3.6. Modelo monofásico para simulación DVR.

Para la Figura 3.7, se tiene que:

θ_a = Ángulo de fase de la tensión en la fase a.

θ_{a-pre} = Ángulo de fase de la tensión en la fase a, antes de la perturbación.

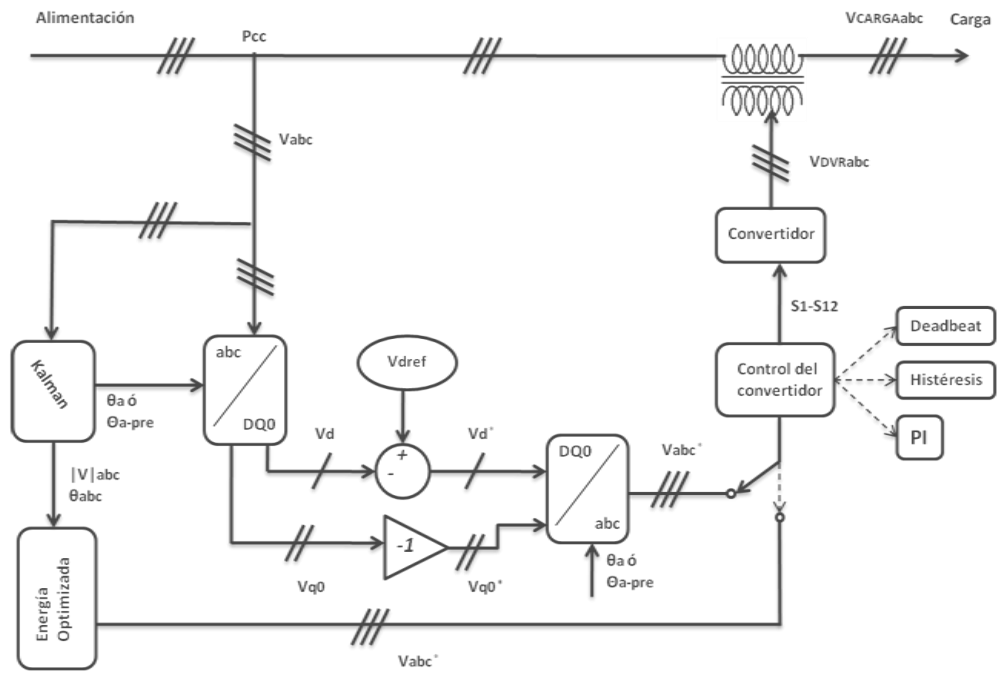
$|V|_{abc}$ = Vector de magnitud de la tensión en las fases a, b y c.

θ_{abc} = Vector de ángulos de fase de la tensión en las fases a, b y c.

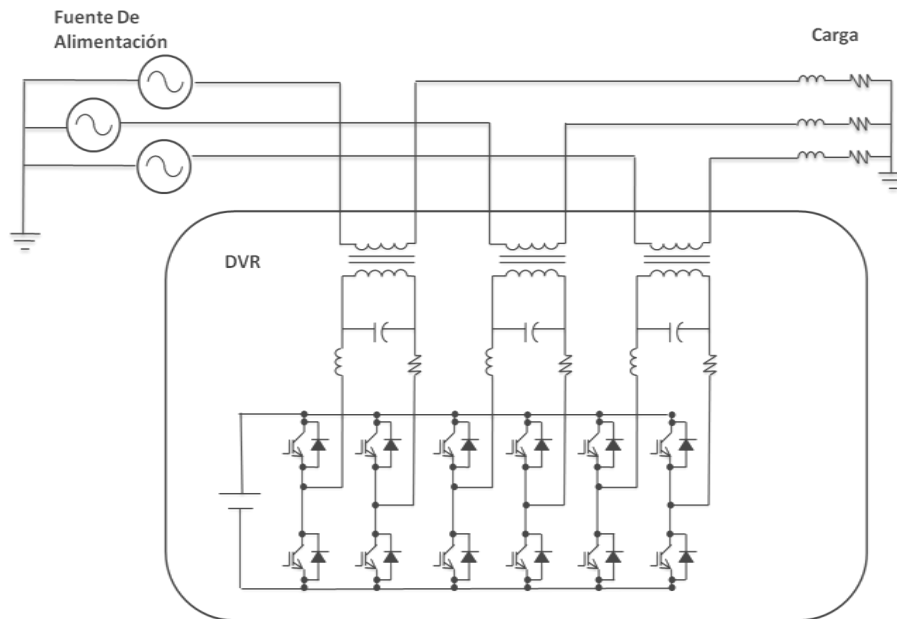
V_d = La componente d de la tensión de alimentación.

V_{q0} = Vector de componentes q y 0 de la tensión de alimentación.

$S_1 - S_{12}$ = Señales de conmutación para el convertidor de trifásico.
 V_{abc}^* = El vector de señales de compensación para las fases a, b y c.



a) Esquema de control.



b) Circuito de potencia.

Figura 3.7. Modelo trifásico para simulación DVR.

3.2. Especificaciones para señales de falla

Antes de definir las perturbaciones a compensar por el DVR es necesario tener en cuenta que éstas provienen de la red de alimentación debido a fallas en algún otro punto del sistema diferente a la barra de conexión del dispositivo o a cargas no lineales conectadas a la red que pueden producir armónicos en tensión (ver Figura 3.8).

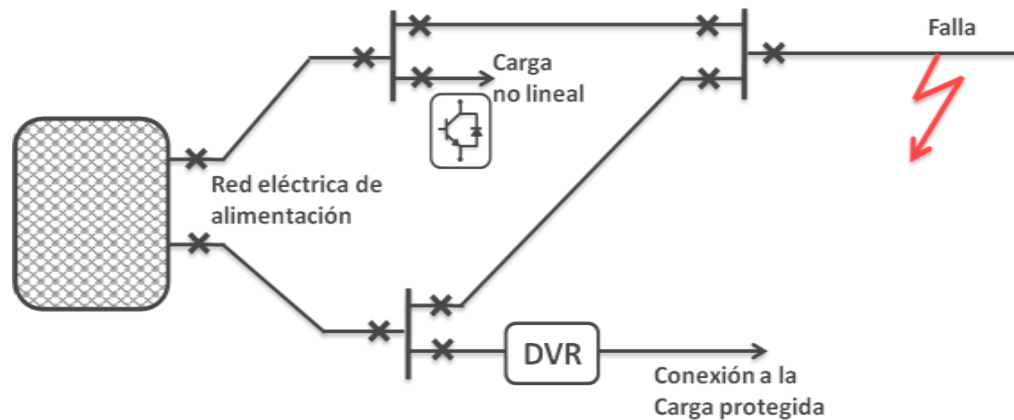


Figura 3.8. Diagrama de origen de perturbaciones en el sistema.

Estas perturbaciones en el sistema de alimentación son simuladas por medio de fuentes de alimentación por fase con perturbaciones de tensión.

A continuación se presentan unas graficas de las características de los huecos y elevaciones de tensión donde Δt representa el tiempo de duración de la falla, ΔV la caída o elevación de tensión según corresponda, V_h la magnitud de la tensión de alimentación durante el hueco de tensión y V_e la magnitud de la tensión de alimentación durante la elevación de tensión.

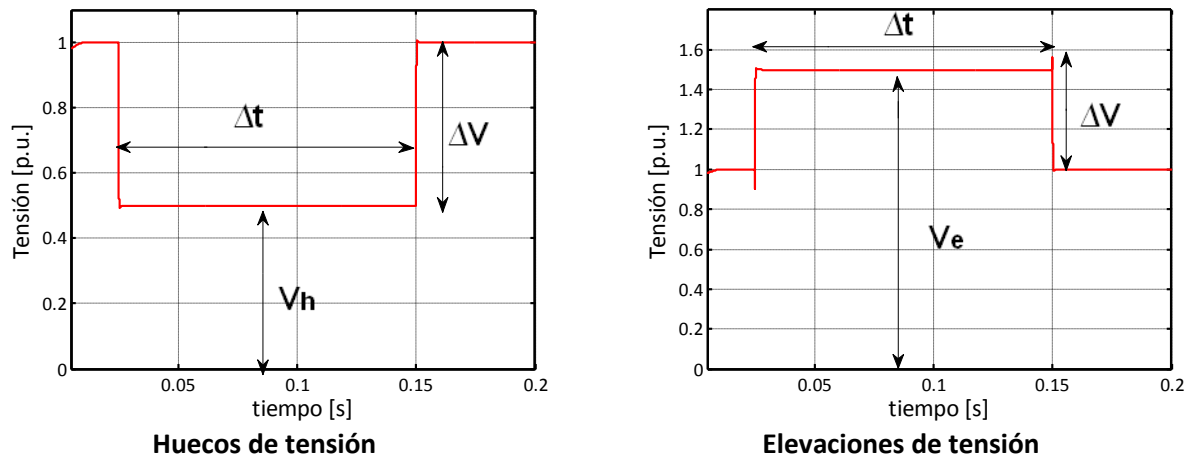


Figura 3.9. Características de huecos y elevaciones de tensión

Las perturbaciones a simular se detallan en las tablas 3.4 y 3.5 para los modelos monofásicos y en las tablas 3.6 y 3.7 para los modelos trifásico del DVR.

<i>Tipo de perturbación</i>	<i>Duración en segundos Δt</i>	<i>ΔV en p.u.</i>	<i>Salto de fase en grados</i>		
Hueco	0,09	0,15	0	35	60
Hueco	0,09	0,5	0	35	60
Hueco	0,09	0,8	0	35	60
Elevación	0,09	0,25	0	35	60
Elevación	0,09	0,6	0	35	60

Tabla 3.4. Perturbaciones a simular modelo monofásico DVR.

Adicionalmente para el modelo monofásico se simula una perturbación causada por componentes armónicas de 5 y 7 orden en la tensión de alimentación. La magnitud, duración y ángulo de fase se especifican en la siguiente tabla.

<i>Tipo de perturbación</i>	<i>Duración en segundos</i>	<i>Magnitud en p.u. respecto a la tensión nominal</i>	<i>Salto de fase en grados</i>
5 y 7 armónico	permanente	0,1 y 0,5	15 y 22

Tabla 3.5. Perturbaciones armónicas a simular modelo monofásico DVR

Para el modelo trifásico se especifica de igual manera los tipos de perturbaciones en las siguientes tablas.

<i>Tipo de perturbación</i>	<i>Duración en segundos Δt</i>	<i>ΔV en p.u.</i>			<i>Salto de fase en grados</i>		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Hueco monofásico	0.09	0,7	0	0	15	0	0
Hueco bifásico	0.09	0,3	0,3	0	35	35	0
Hueco trifásico	0.09	0,1	0,1	0,1	20	20	20
Elevación monofásica	0.09	0,15	0	0	40	0	0
Elevación bifásica	0.09	0,3	0	0,3	10	0	10
Elevación trifásica	0.09	0,25	0,25	0,25	25	25	25

Tabla 3.6. Perturbaciones a simular modelo trifásico DVR.

<i>Tipo de perturbación</i>	<i>Duración en segundos</i>	<i>Magnitud en p.u con respecto a la tensión nominal</i>			<i>Salto de fase en grados</i>		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>
Desequilibrio	permanente	1,15	0,8	0,65	30	-10	0
5 y 7 armónico	permanente	0.1 y 0.05			15 y 22	-105 y -98	135 y 142

Tabla 3.7. Perturbaciones permanentes a simular modelo trifásico DVR.

4. Simulación y análisis de resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación de los modelos especificados en el capítulo 3. Las simulaciones se realizaron en el software ATP DRAW, en el cual se utilizó la herramienta MODELS (*Control System Language*) para programar los diferentes algoritmos para el cálculo de la señal de referencia (filtro de Kalman y transformación DQ0), control del convertidor (deadbeat, histéresis y PI), estrategias de compensación (pre-falla, en fase y energía optimizada), medidores de potencia activa y fuentes de alimentación monofásicas con perturbaciones. Los demás elementos utilizados en las simulaciones corresponden a componentes disponibles en las diferentes librerías de ATP DRAW (resistencias, bobinas, condensadores, transformadores, interruptores, entre otros).

4.1. Resultados y análisis de simulación para modelos monofásicos.

Para el cálculo de la señal de referencia se utiliza el filtro de Kalman de acuerdo al esquema de control mostrado en la Figura 3.6.b, con el cual se estiman los valores de magnitud y ángulo de fase de la onda de tensión de alimentación medida en el punto de conexión PCC. Para cada una de las diferentes simulaciones se pudo comprobar que el filtro de Kalman es un estimador confiable y rápido en la detección del inicio y final de la perturbación en aproximadamente 2 [ms]. De igual forma se pudo comprobar la efectividad del algoritmo en la estimación de la magnitud de la tensión de alimentación durante la perturbación. En las gráficas de la Figura 4.1 se observa la respuesta del filtro de Kalman ante un hueco de tensión con magnitud del 0,15 en p.u. y salto de fase de 35°.

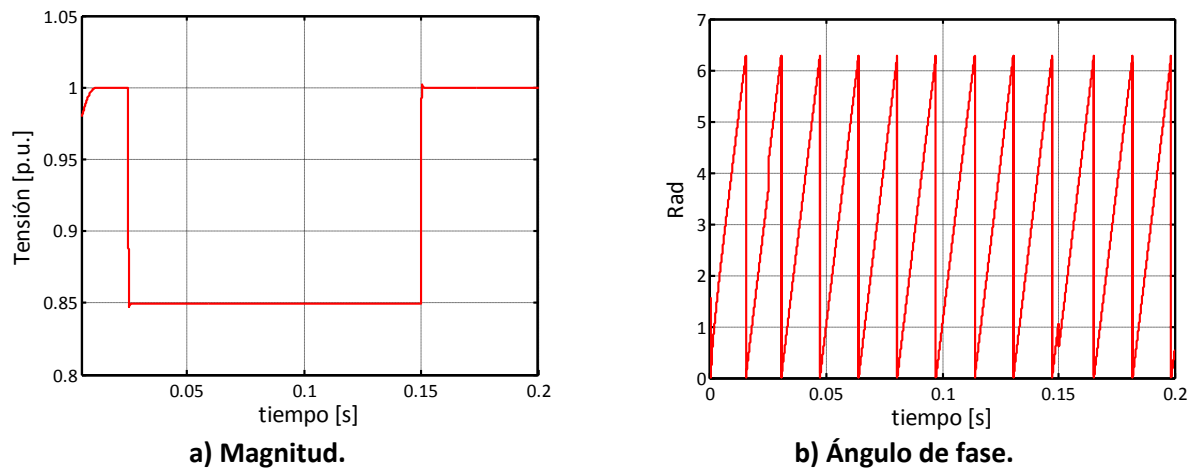


Figura 4.1. Estimación de parámetros de la onda de tensión de alimentación.

Para verificar las opciones de compensación del DVR con cada una de las estrategias de compensación y hacer un análisis comparativo entre las mismas, en la Figura 4.3 se presentan los resultados de simulación de un hueco de tensión de 0,15 p.u. y salto de fase de 0° entre 0,025 segundos y 0,15 segundos. Los resultados de simulación corresponden a:

- Figura 4.3.a. Tensión en el sistema de alimentación VPcc y tensión en la carga VI para la estrategia de compensación en pre-falla.
- Figura 4.3.b. Tensión en el sistema de alimentación VPcc y tensión en la carga VI para la estrategia de compensación en fase.
- Figura 4.3.c. Tensión en el sistema de alimentación VPcc y tensión en la carga VI para la estrategia de compensación con energía optimizada.
- Figura 4.3.d. Tensión inyectada por el DVR para compensación en pre-falla, en fase y con energía optimizada.
- Figura 4.3.e. Potencia activa inyectada por el DVR para compensación en pre-falla, en fase y con energía optimizada.
- Figura 4.3.f. Tensión en la barra de continúa para compensación en pre-falla, en fase y con energía optimizada.

Para facilitar el análisis, los resultados se muestran en valores en por unidad de acuerdo a las siguientes bases:

Tensión de fase base $13,2/\sqrt{3}$ kV.
 Potencia activa base de 42,667 kW.
 Tensión de continua base 1500 V.

Los resultados de simulación para los demás huecos de tensión especificados en la Tabla 3.4, se presentan de la Figura 4.4 a la Figura 4.11. Los resultados se presentan siguiendo el mismo orden de la Figura 4.3. El hueco de tensión para todos los casos inicia en 0,025 segundos y termina en 0,15 segundos. A continuación se presenta el esquema unifilar del sistema a simular:

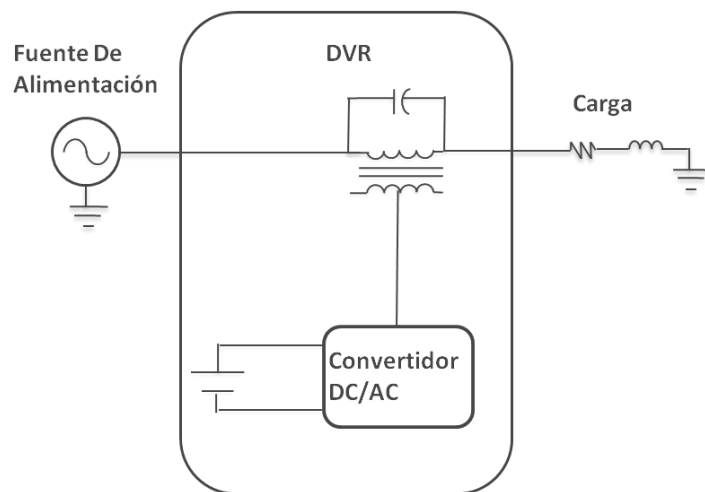
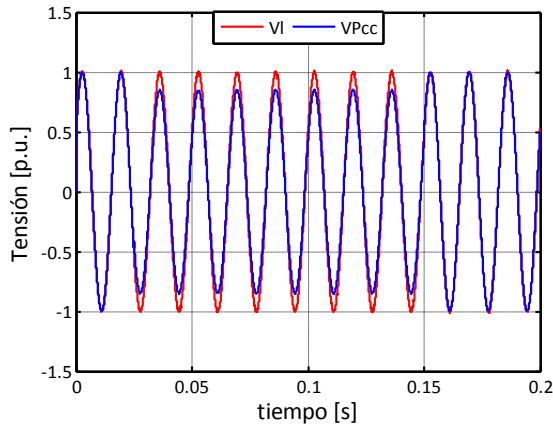
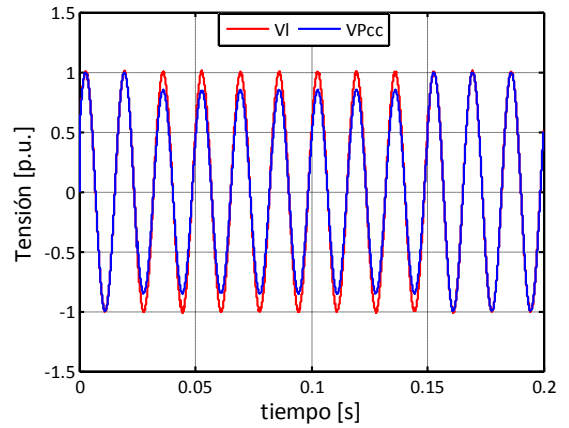


Figura 4.2. Diagrama unifilar por fase a simular.

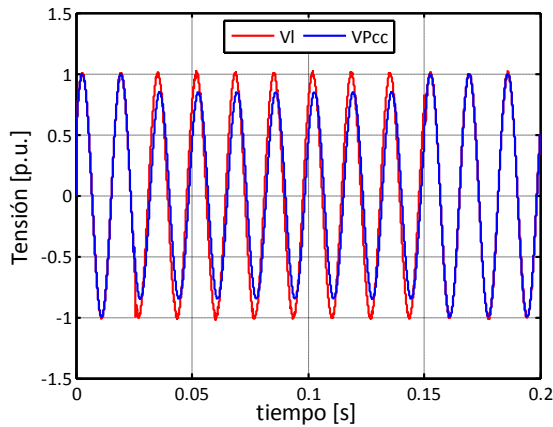
Perturbación 1. Hueco de tensión de 0,15 p.u y salto de fase de 0°.



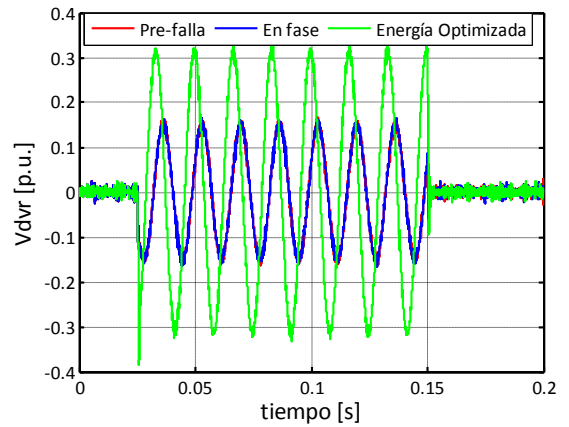
a) Compensación en Pre-falla.



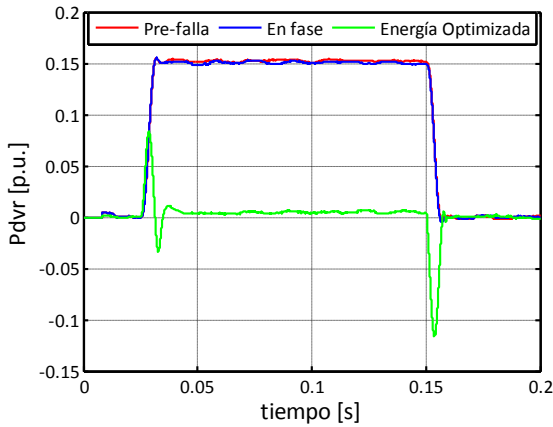
b) Compensación en Fase.



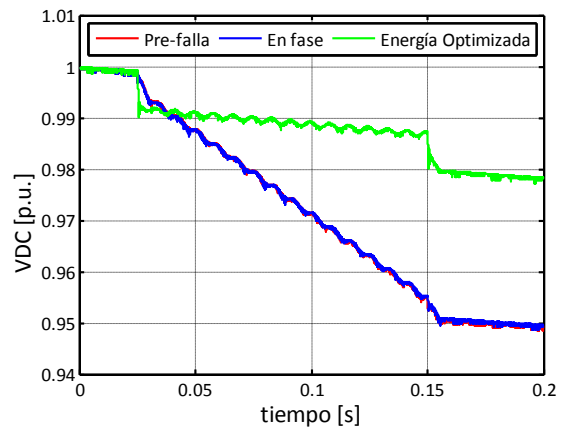
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



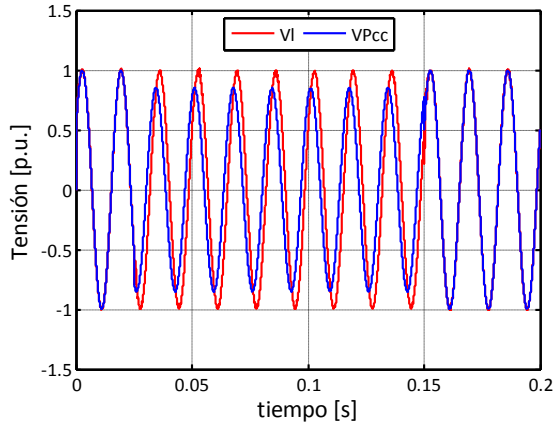
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



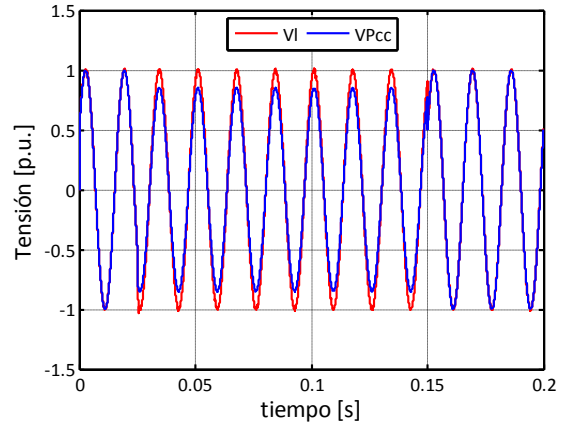
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.3. Resultados de simulación monofásica perturbación 1.

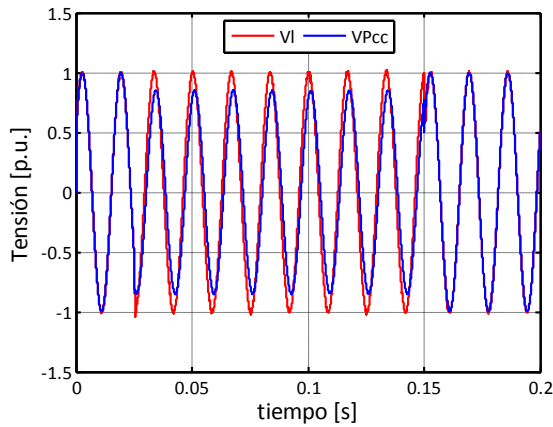
Perturbación 2. Hueco de tensión de 0,15 p.u y salto de fase de 35°.



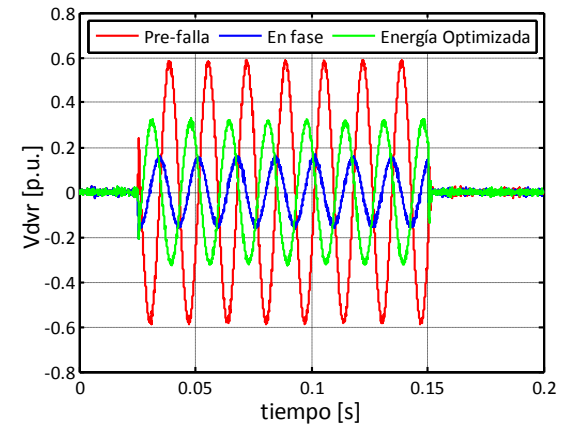
a) Compensación en Pre-falla.



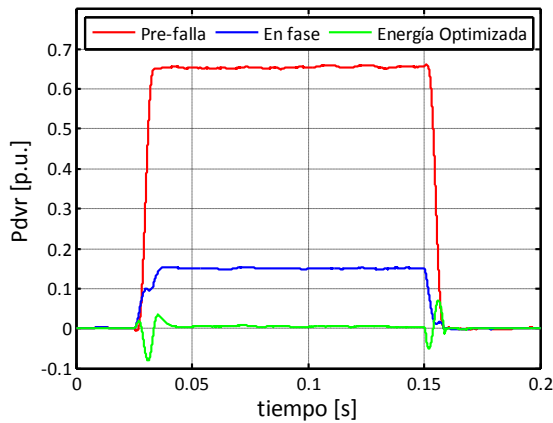
b) Compensación en Fase.



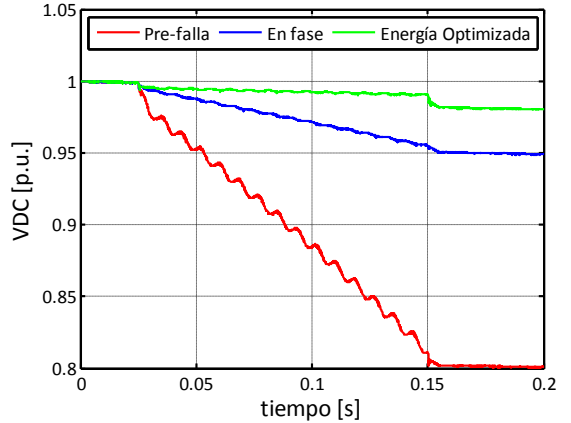
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



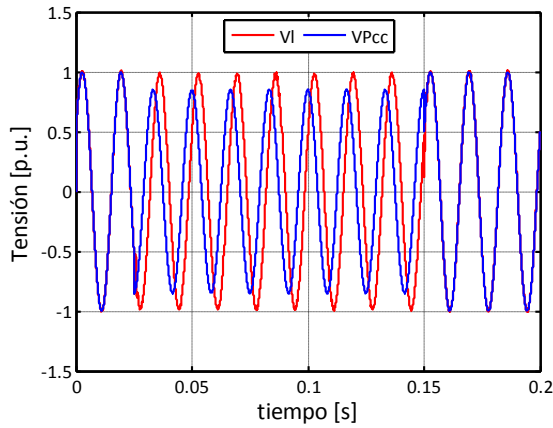
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



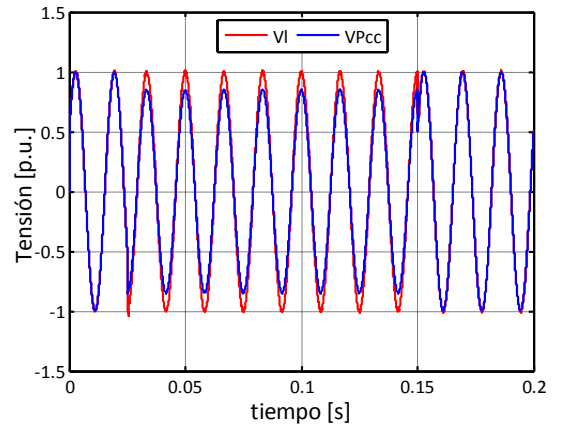
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.4. Resultados de simulación monofásica perturbación 2.

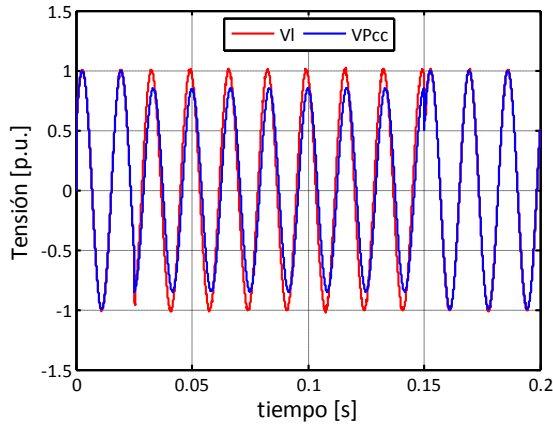
Perturbación 3. Hueco de tensión de 0,15 p.u y salto de fase de 60°.



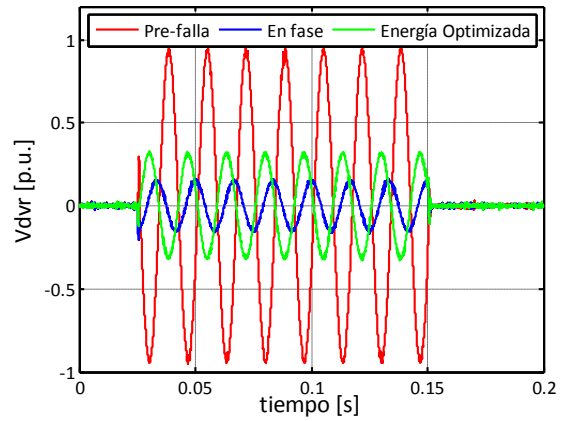
a) Compensación en Pre-falla.



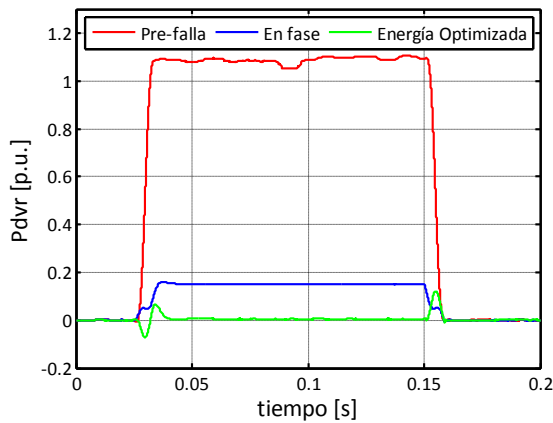
b) Compensación en Fase.



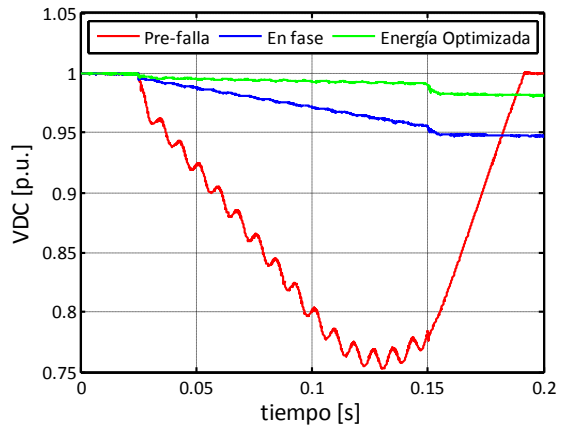
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



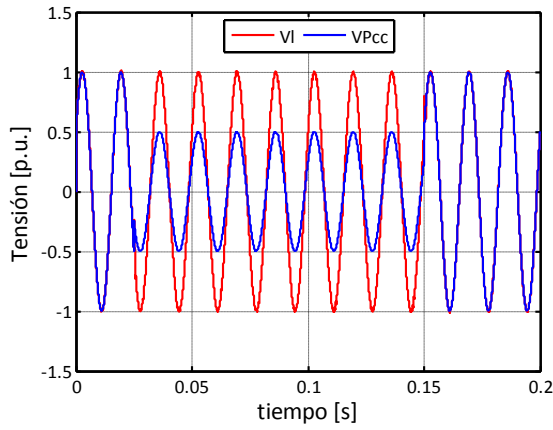
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



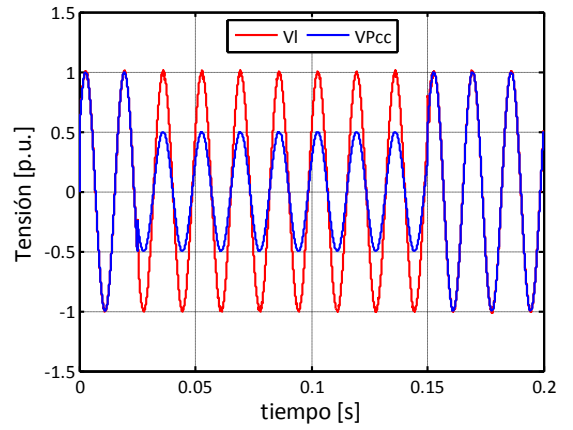
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.5. Resultados de simulación monofásica perturbación 3.

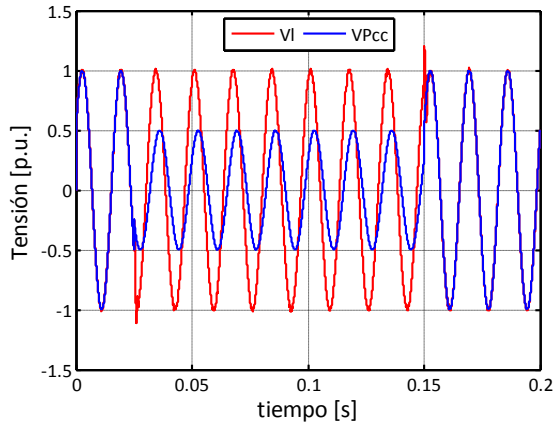
Perturbación 4. Hueco de tensión de 0,5 p.u y salto de fase de 0°.



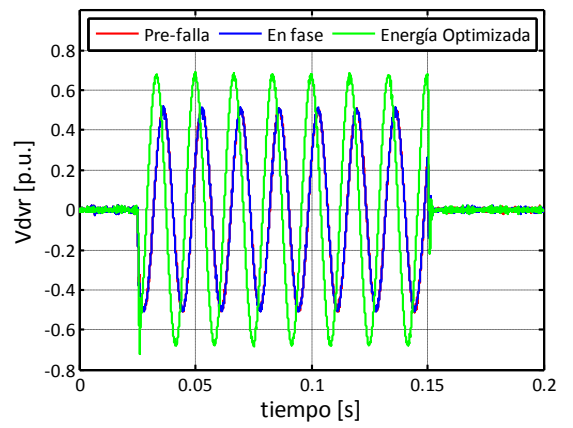
a) Compensación en Pre-falla.



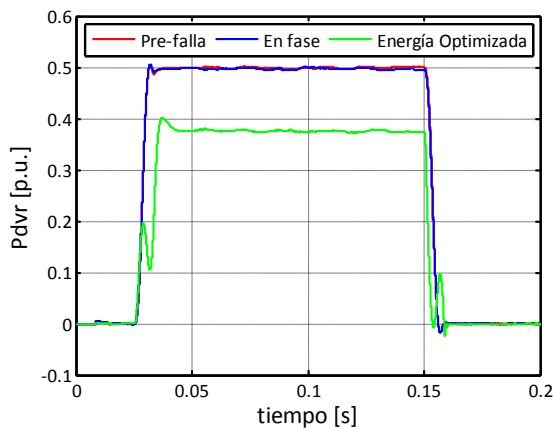
b) Compensación en Fase.



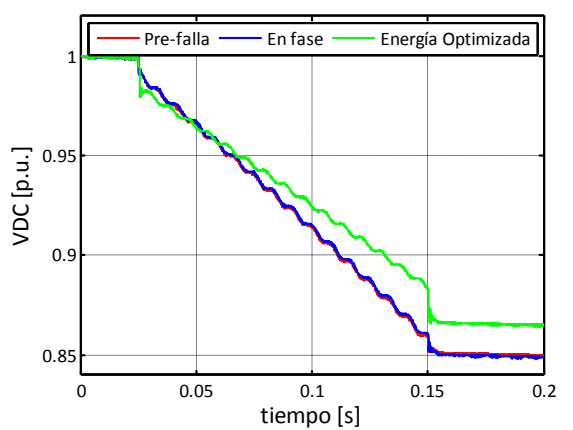
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



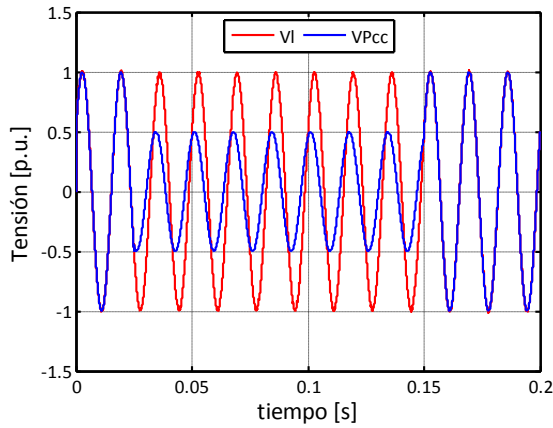
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



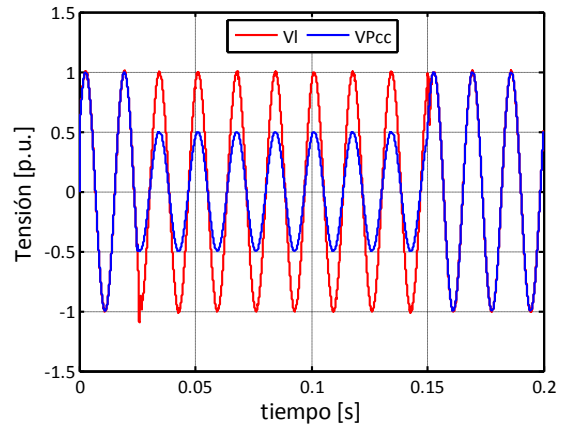
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.6. Resultados de simulación monofásica perturbación 4.

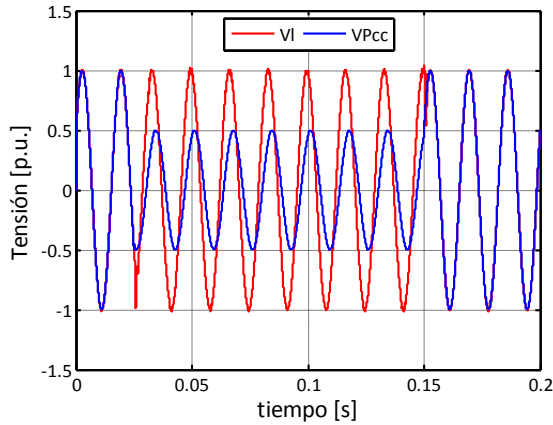
Perturbación 5. Huevo de tensión de 0,5 p.u y salto de fase de 35°.



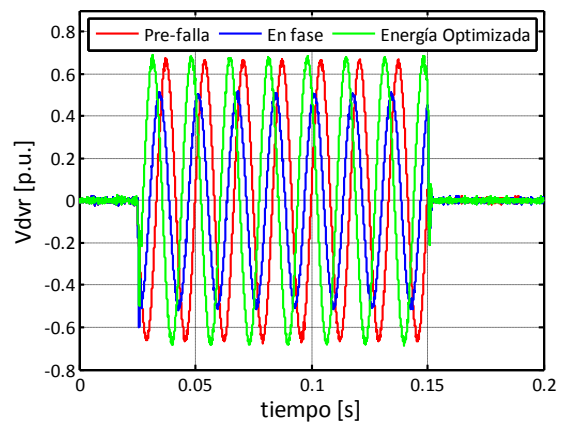
a) Compensación en Pre-falla.



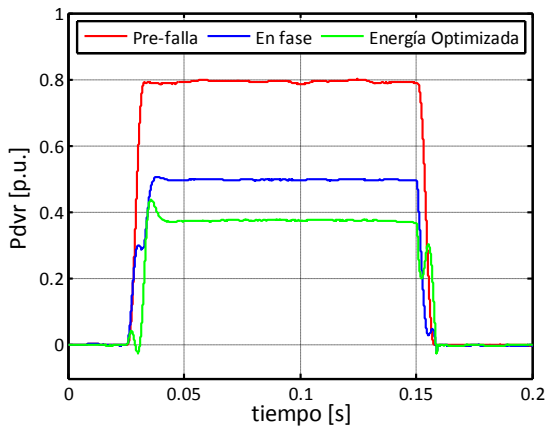
b) Compensación en Fase.



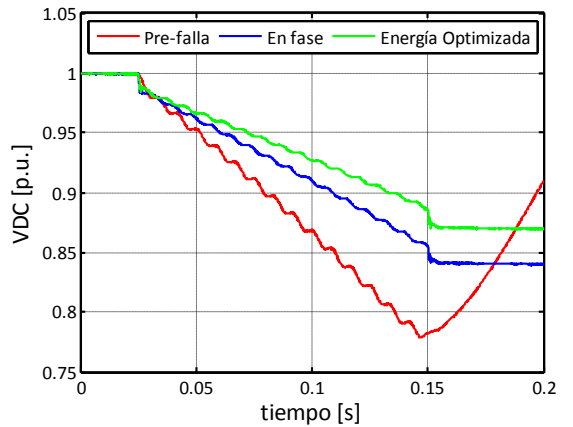
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



e) Comparación entre potencia activa inyectada.



f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.7. Resultados de simulación monofásica perturbación 5.

Perturbación 6. Hueco de tensión de 0,5 p.u y salto de fase de 60°.

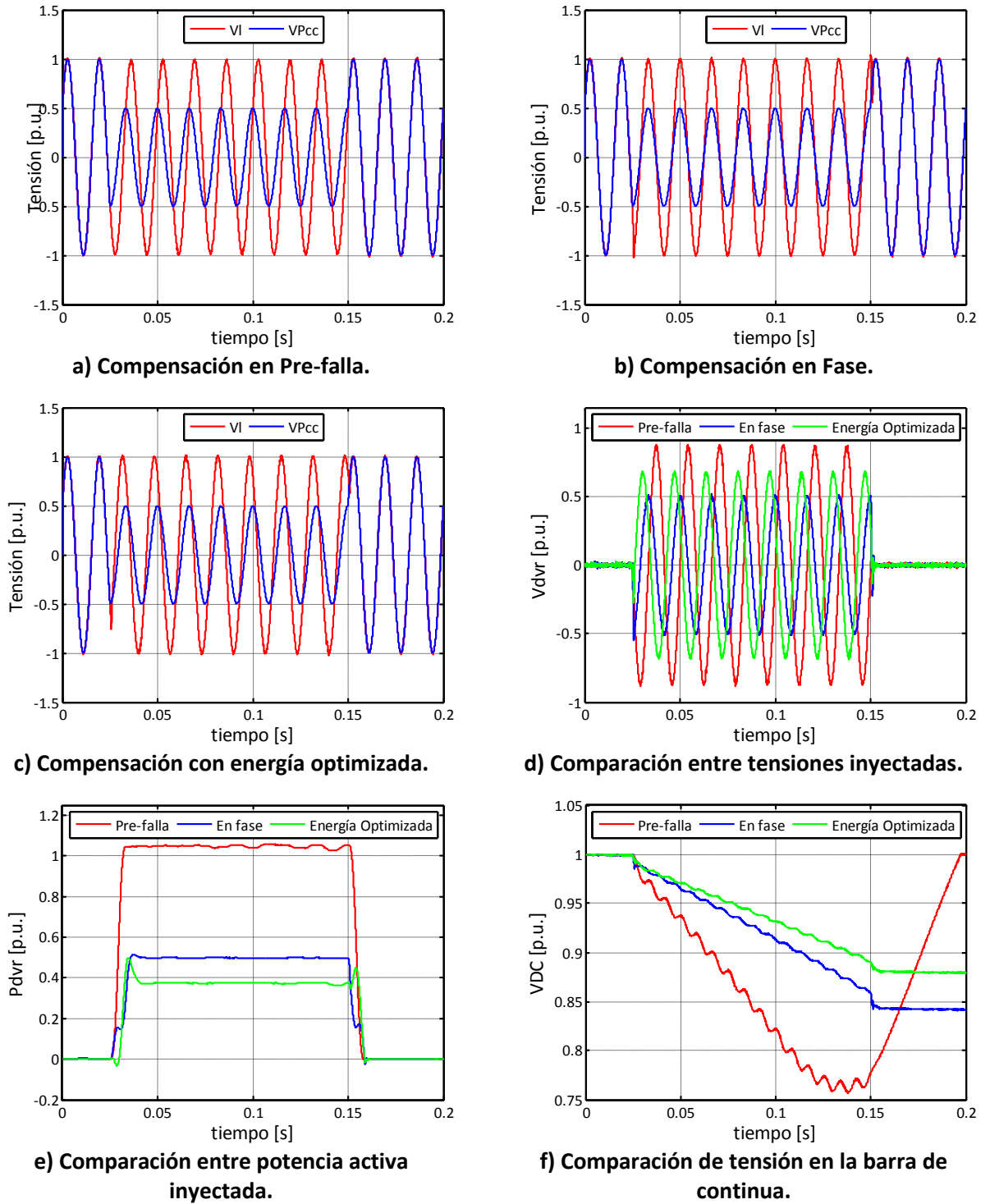
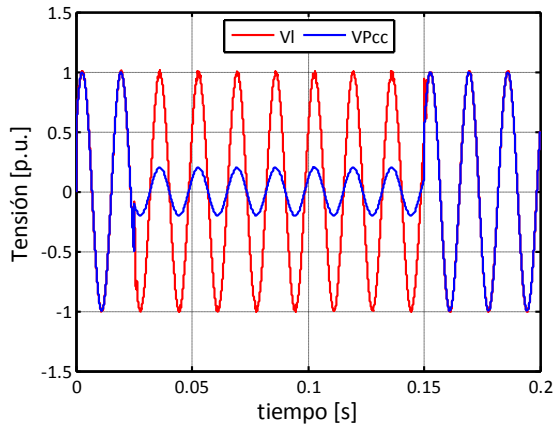
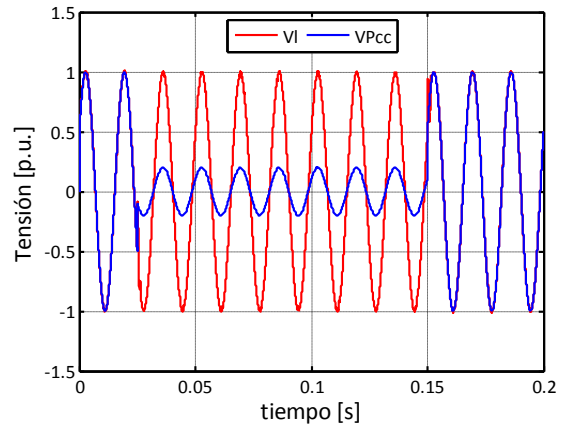


Figura 4.8. Resultados de simulación monofásica perturbación 6.

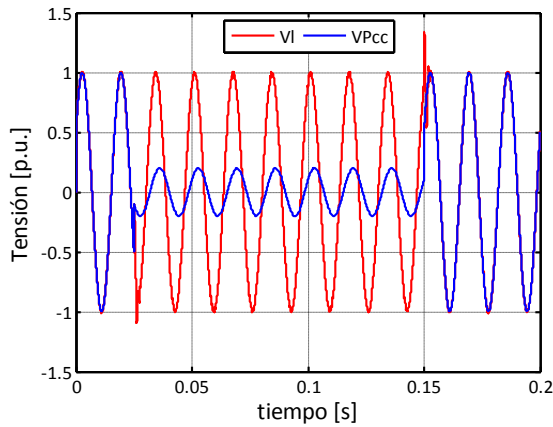
Perturbación 7. Hueco de tensión de 0,8 p.u y salto de fase de 0°.



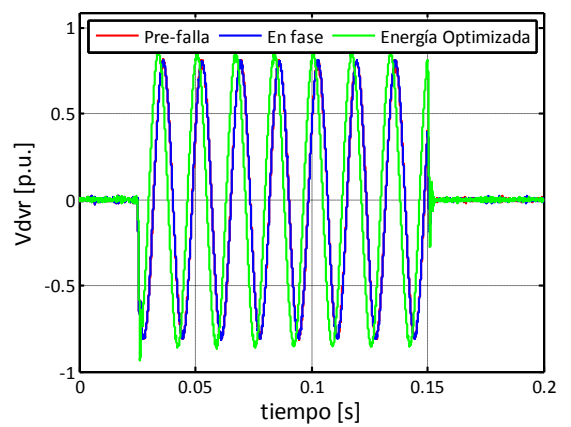
a) Compensación en Pre-falla.



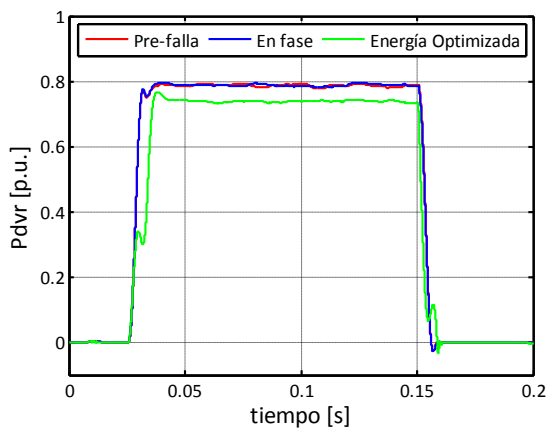
b) Compensación en Fase.



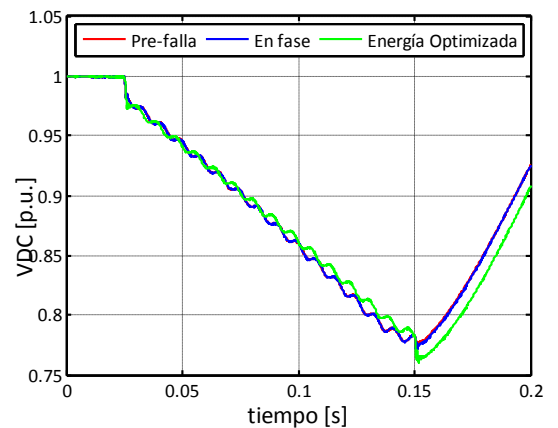
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



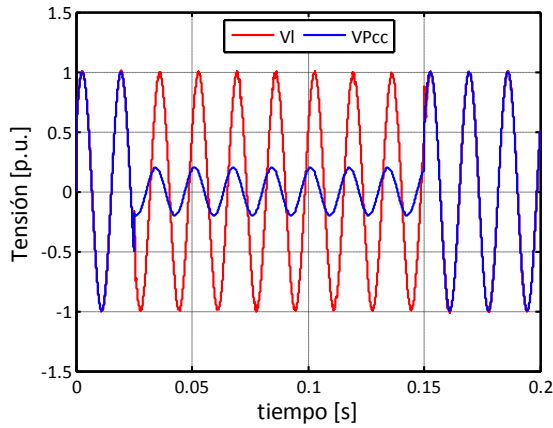
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



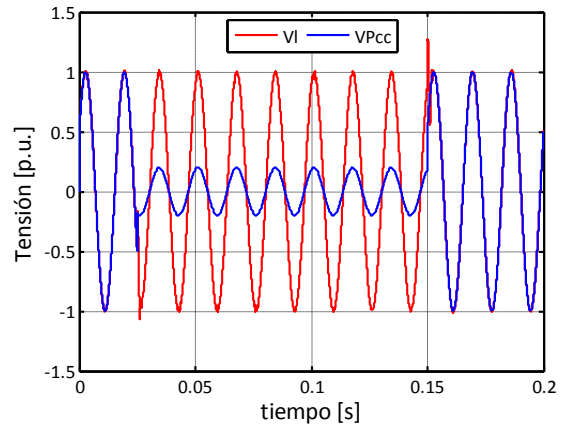
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.9. Resultados de simulación monofásica perturbación 7.

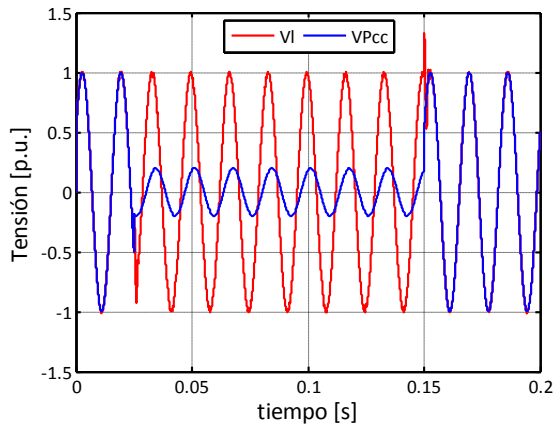
Perturbación 8. Huevo de tensión de 0,8 p.u y salto de fase de 35°.



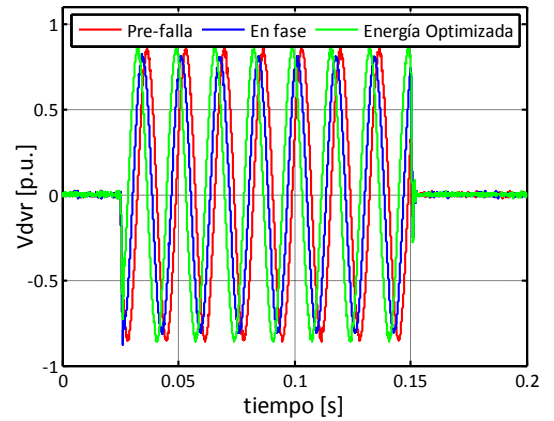
a) Compensación en Pre-falla.



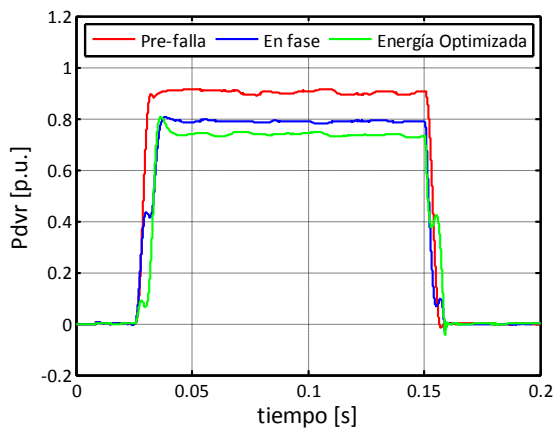
b) Compensación en Fase.



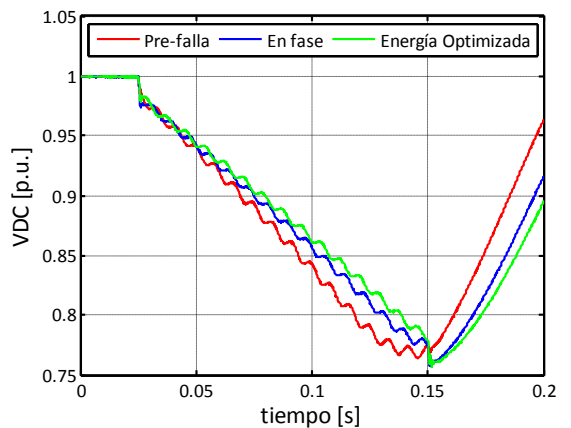
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



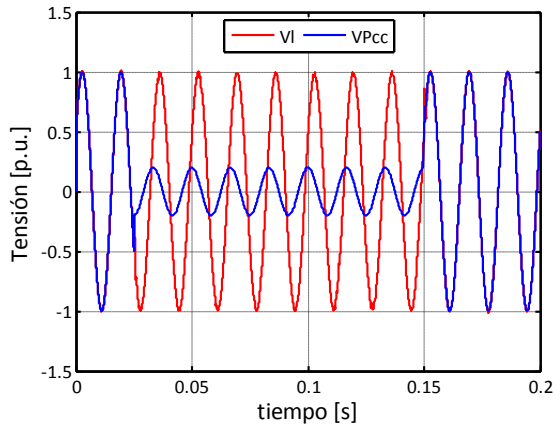
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



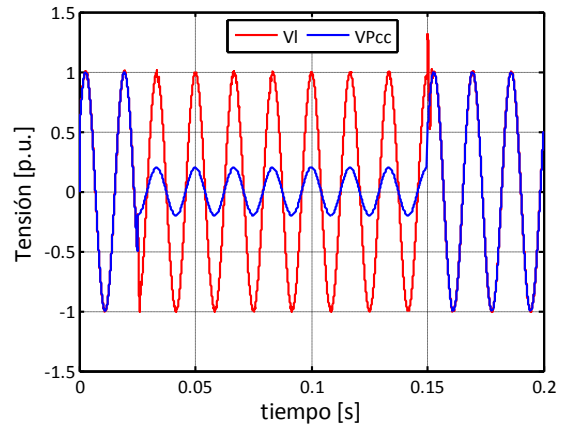
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.10. Resultados de simulación monofásica perturbación 8.

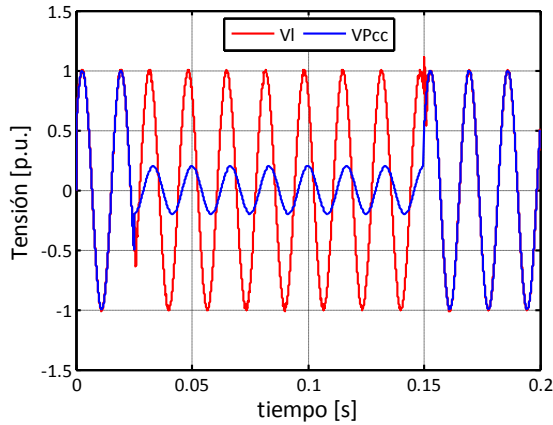
Perturbación 9. Huevo de tensión de 0,8 p.u y salto de fase de 60°.



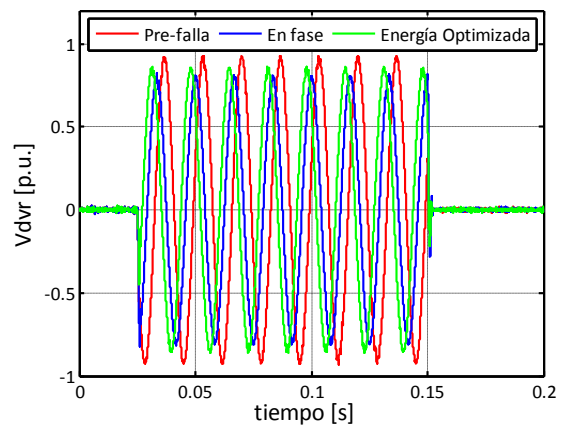
a) Compensación en Pre-falla.



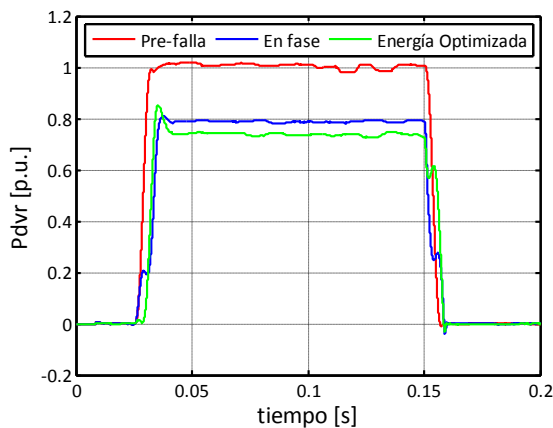
b) Compensación en Fase.



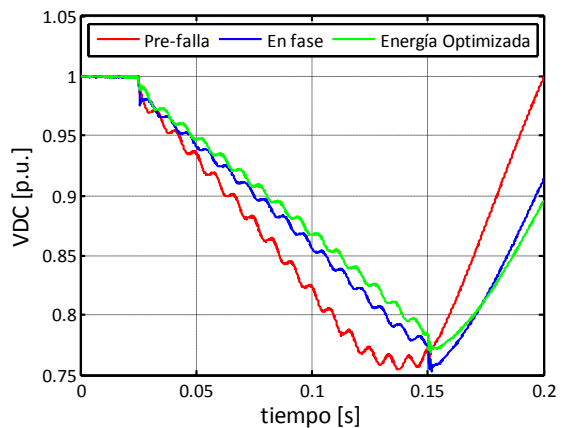
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



e) Comparación entre potencia activa inyectada.



f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.11. Resultados de simulación monofásica perturbación 9.

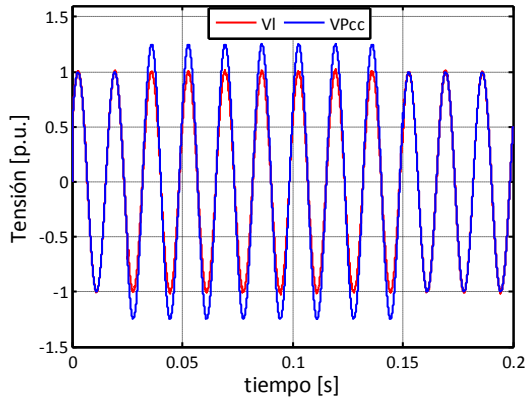
Análisis de resultados.

El análisis se realiza en base a los resultados obtenidos en las simulaciones y en las gráficas presentadas en la sección 2.3 con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del DVR y generalizar los resultados teniendo en cuenta que la simulación de todas las posibles combinaciones entre magnitud del hueco de tensión y saltos de fase representarían un trabajo tedioso e innecesario.

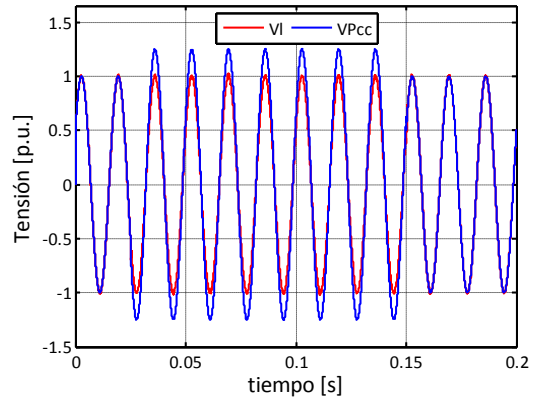
- ✓ Para las tres estrategias de compensación implementadas el valor en magnitud de la tensión en la carga es mantenido en su valor nominal ante cualquier hueco de tensión presente en el sistema de alimentación. Por tanto se puede verificar la efectividad de los algoritmos utilizados para el cálculo de la tensión de referencia, el control del convertidor y la respuesta del filtro.
- ✓ Comparando las tensiones inyectadas en cada una de las estrategias de compensación obtenidas a partir de la simulación y las gráficas de las Figura 2.25, se puede establecer que la menor tensión inyectada para huecos con salto de fase diferente a cero, corresponde a la estrategia de compensación en fase. La mayor tensión puede presentarse en la compensación en pre-falla o energía optimizada dependiendo del hueco de tensión.
- ✓ En los gráficos de comparación entre potencia activa inyectada, se puede comprobar que la mínima potencia activa inyectada por el DVR para cualquier tipo de hueco de tensión corresponde a la compensación con energía optimizada validando de esta manera la efectividad de esta estrategia. De otra manera la compensación en pre-falla presenta la mayor potencia inyectada para huecos con salto de fase diferente a cero. Esta conclusión puede comprobarse de acuerdo a lo que se puede observar en la Figura 2.27.
- ✓ En la compensación con energía optimizada es necesario tener en cuenta que la tensión en la barra de continua puede verse disminuida en mayor proporción en el inicio y final del hueco, debido a que esta estrategia inyecta un valor mayor de potencia activa mientras el valor de α_{opt} es ajustado.
- ✓ Con respecto a la tensión en la barra de continua se puede evidenciar que existe una relación directa con la potencia inyectada, ya que al ser mayor esta potencia, la tensión en la barra de continua disminuye más rápidamente como se puede observar en las figuras 4.4.e y 4.4.f.
- ✓ El salto de fase en la tensión de la carga depende principalmente de la estrategia de compensación utilizada, siendo la compensación en pre-falla la óptima para evitar saltos bruscos de fase al inicio del hueco de tensión, teniendo en cuenta que las condiciones de pre-falla son mantenidas tanto en magnitud como ángulo de fase. La compensación en fase por el contrario introduce para cada hueco un salto de fase en la tensión de la carga igual al del hueco de la tensión de alimentación. Para energía optimizada el salto de fase en la tensión de la carga para saltos de fase mayores a cero en la tensión de alimentación, es el mayor en las estrategias de compensación, por tal razón no puede ser aplicada para proteger cargas sensibles a saltos de fase, a menos que se ajuste gradualmente el valor de α_{opt} .

A continuación se presentan los resultados de simulación de compensación del DVR ante elevaciones de tensión presentes en el sistema de alimentación. Estos están ordenados siguiendo la misma estructura de la Figura 4.3.

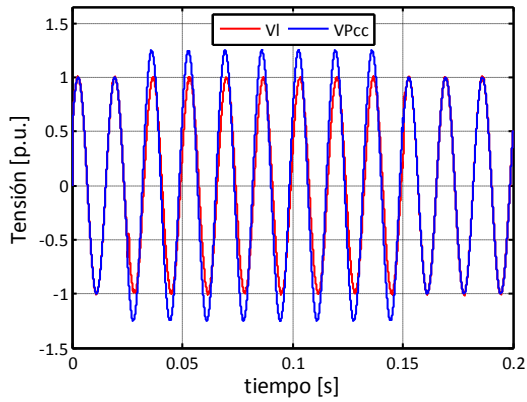
Perturbación 10. Elevación de tensión de 0,25 p.u y salto de fase de 0°.



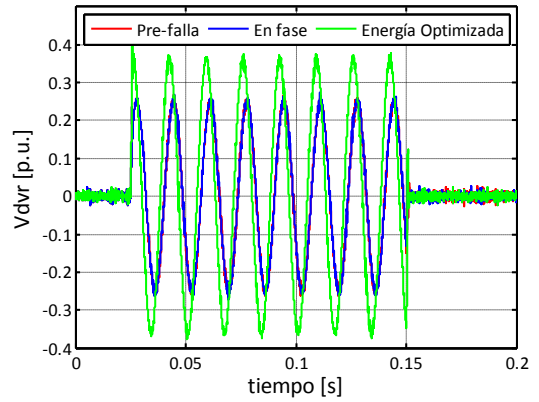
a) Compensación en Pre-falla.



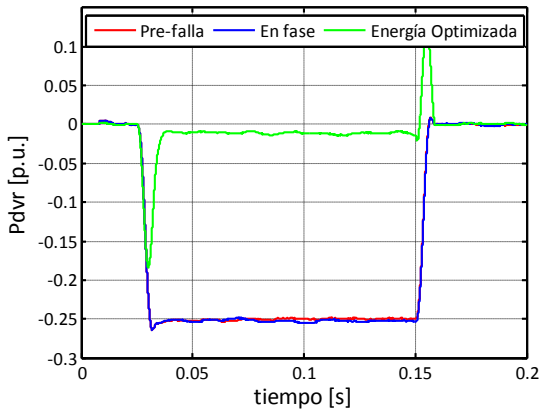
b) Compensación en Fase.



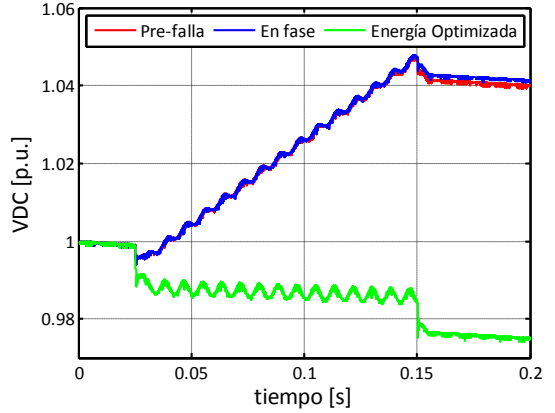
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



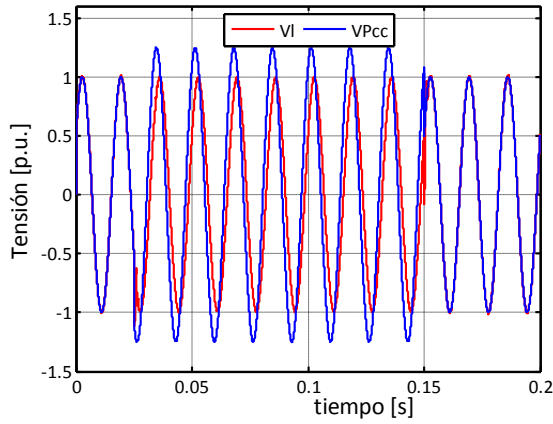
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



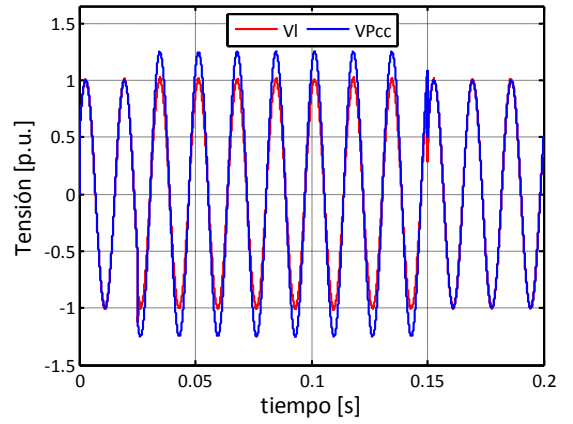
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.12. Resultados de simulación monofásica perturbación 10.

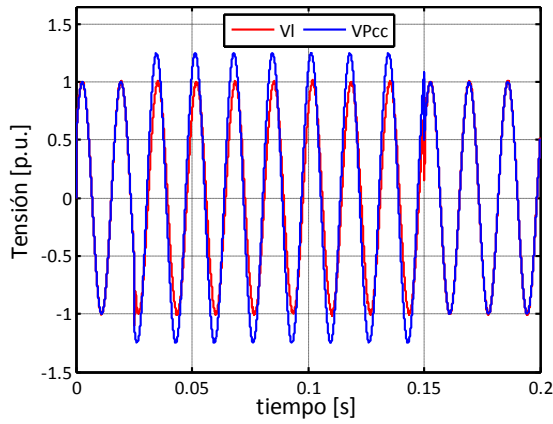
Perturbación 11. Elevación de tensión de 0,25 p.u y salto de fase de 30°



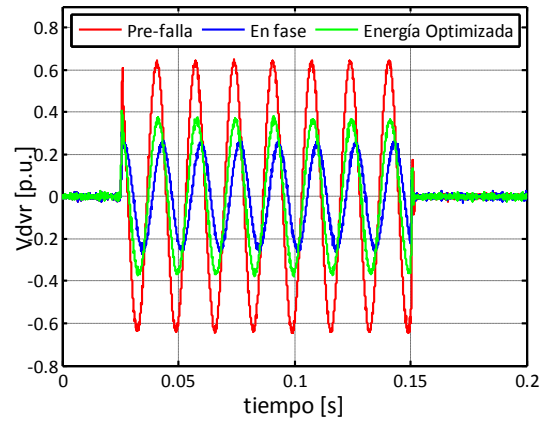
a) Compensación en Pre-falla.



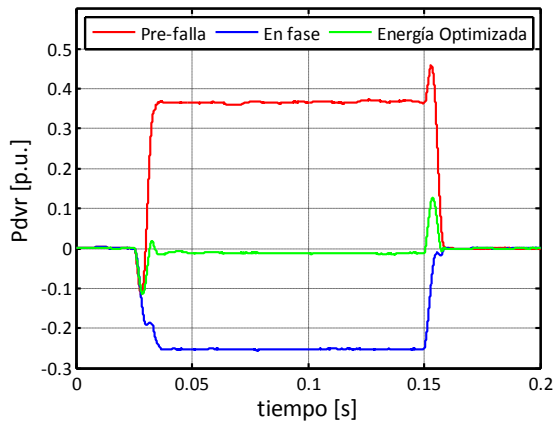
b) Compensación en Fase.



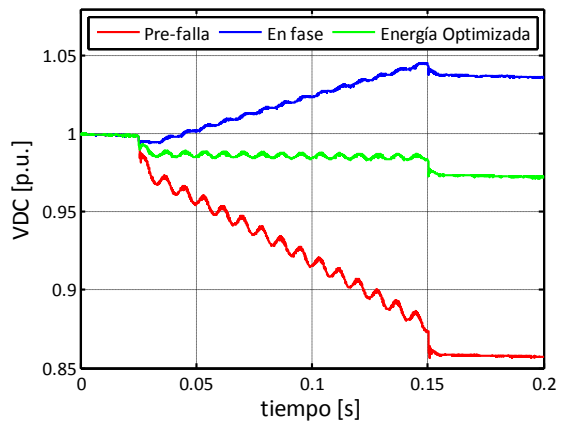
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



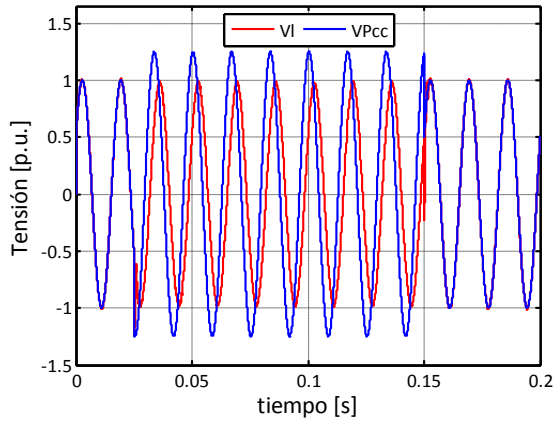
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



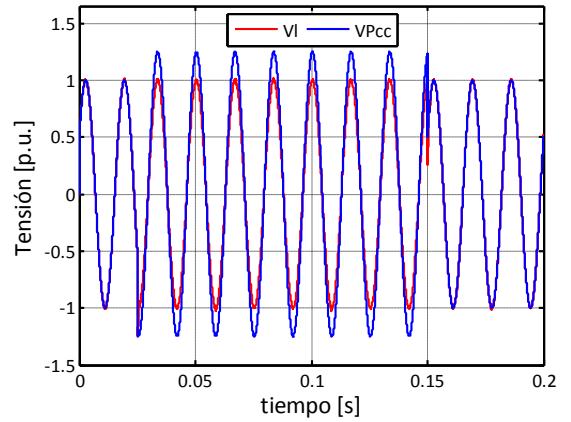
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.13. Resultados de simulación monofásica perturbación 11.

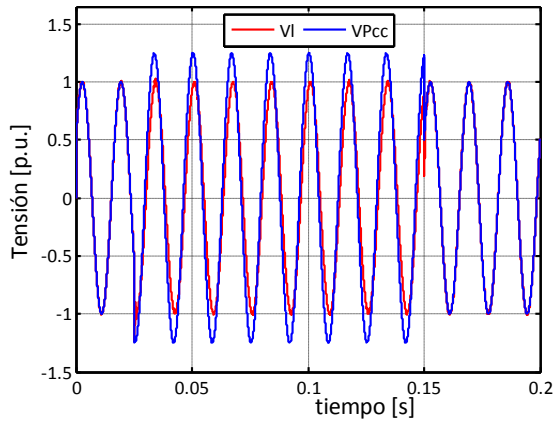
Perturbación 12. Elevación de tensión de 0,25 p.u y salto de fase de 50°



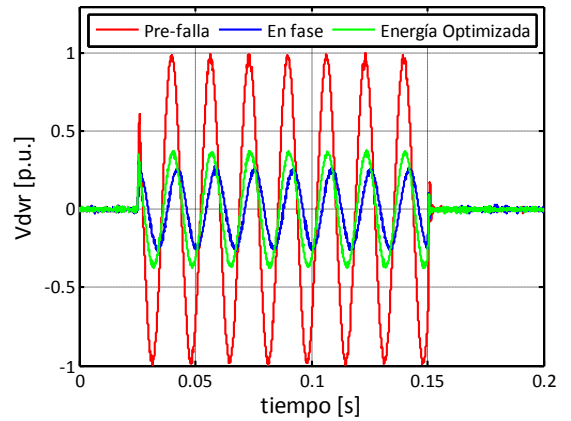
a) Compensación en Pre-falla.



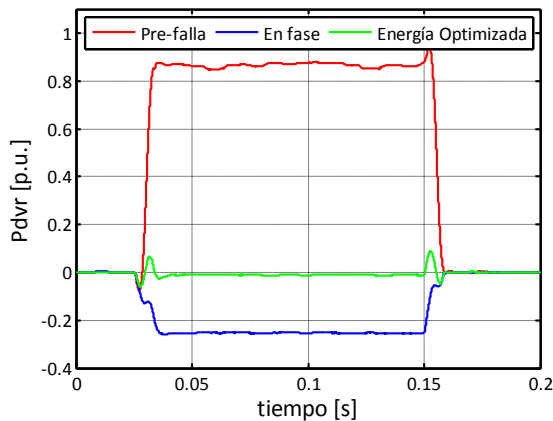
b) Compensación en Fase.



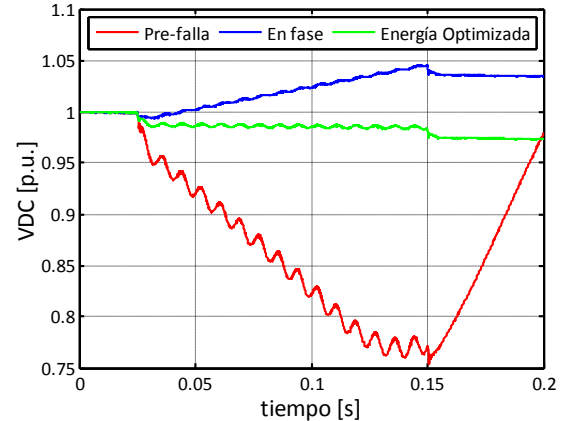
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



e) Comparación entre potencia activa inyectada.



f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.14. Resultados de simulación monofásica perturbación 12.

Perturbación 13. Elevación de tensión de 0,6 p.u y salto de fase de 0°

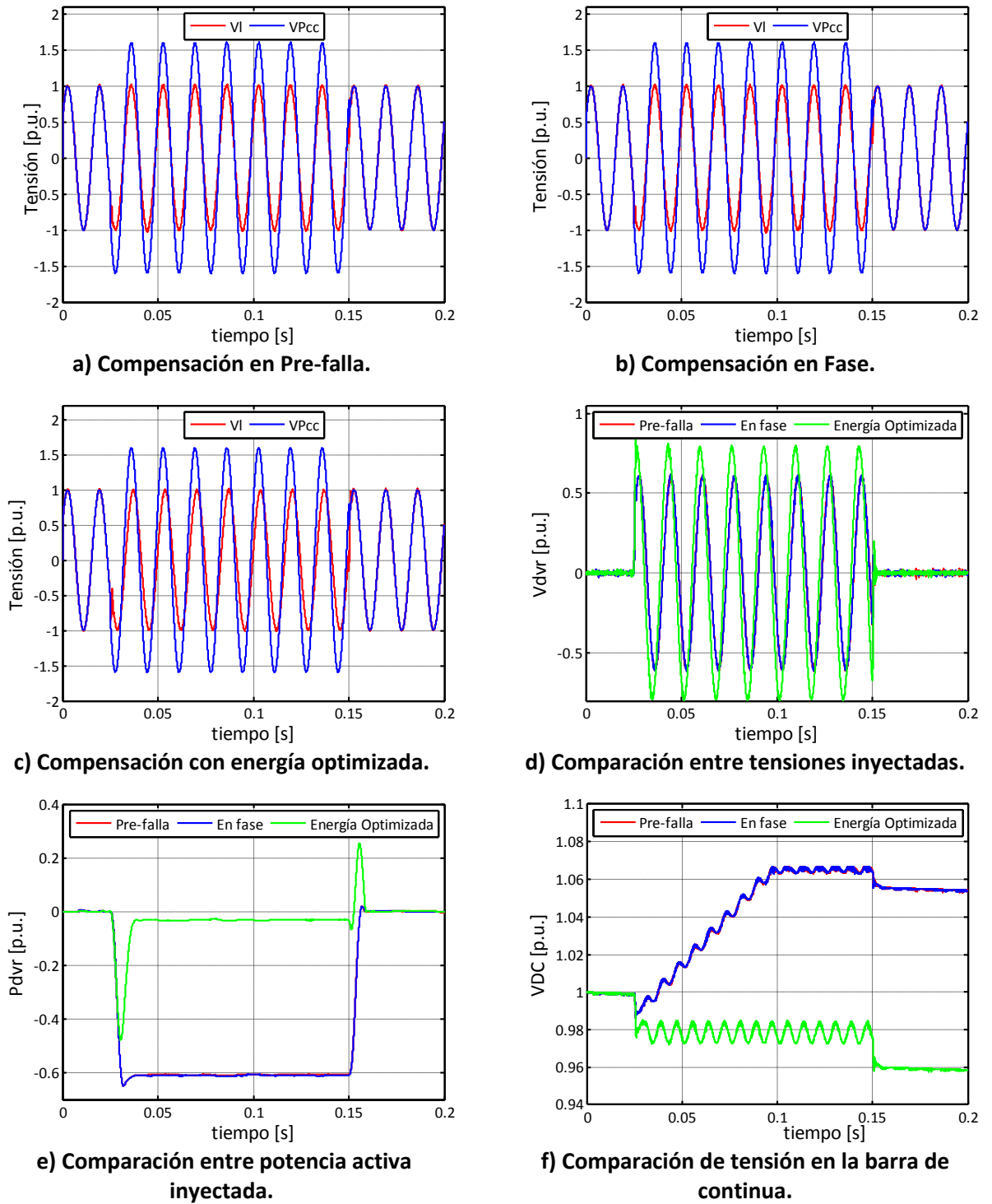
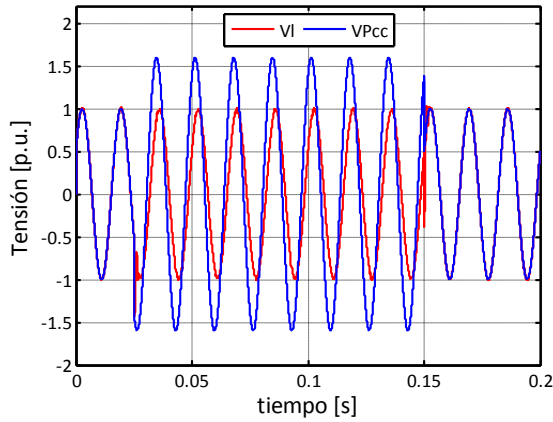
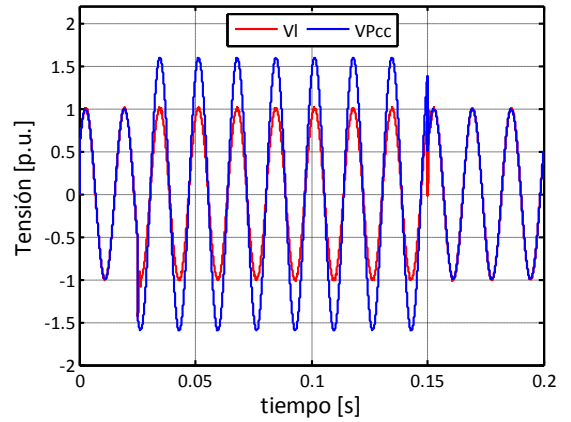


Figura 4.15. Resultados de simulación monofásica perturbación 13.

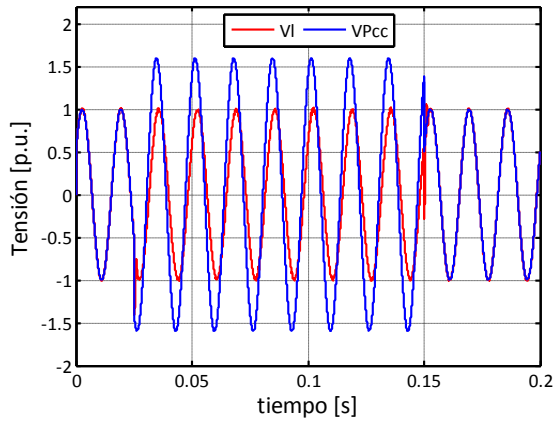
Perturbación 14. Elevación de tensión de 0,6 p.u y salto de fase de 30°



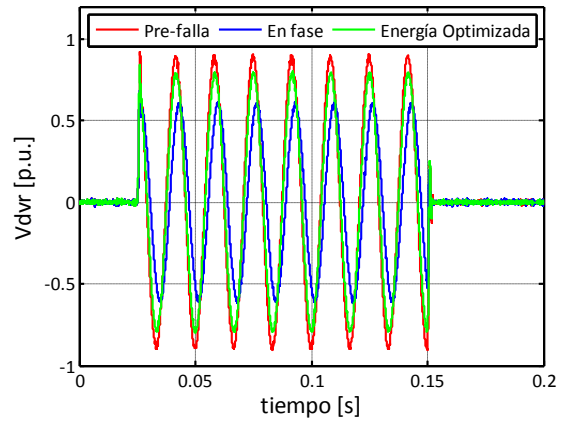
a) Compensación en Pre-falla.



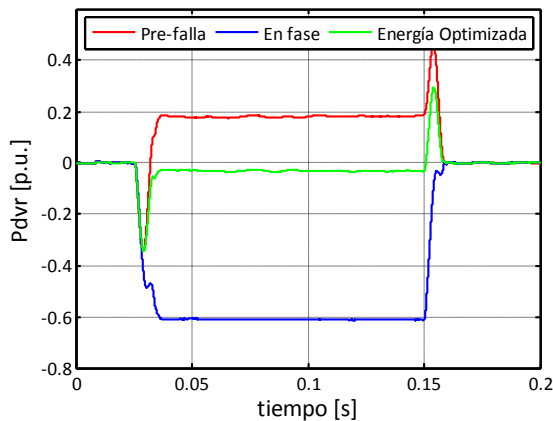
b) Compensación en Fase.



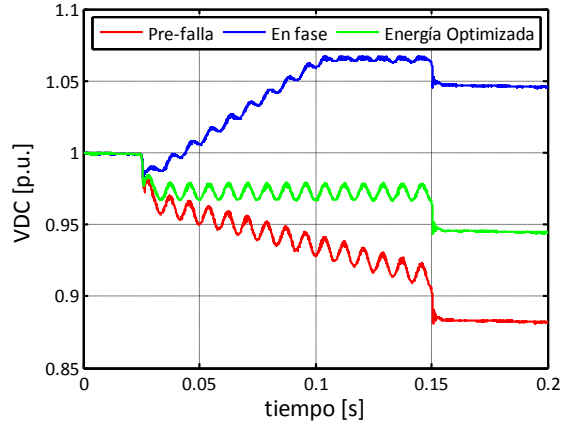
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



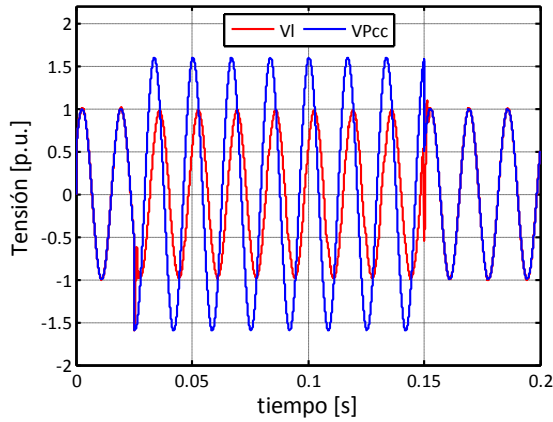
e) Comparación entre potencia activa inyectada.



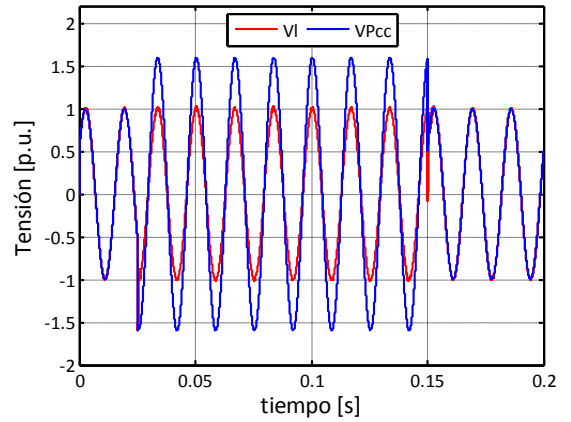
f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.16. Resultados de simulación monofásica perturbación 14.

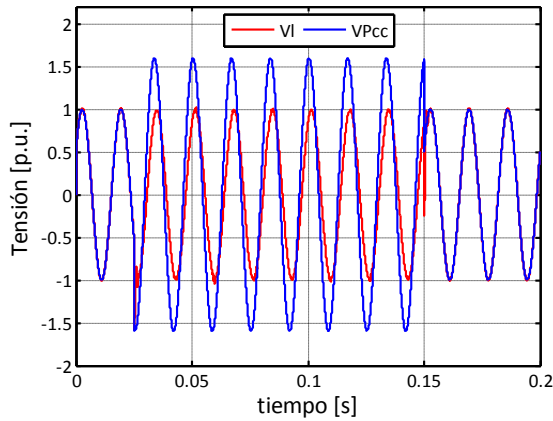
Perturbación 15. Elevación de tensión de 0,6 p.u y salto de fase de 50°



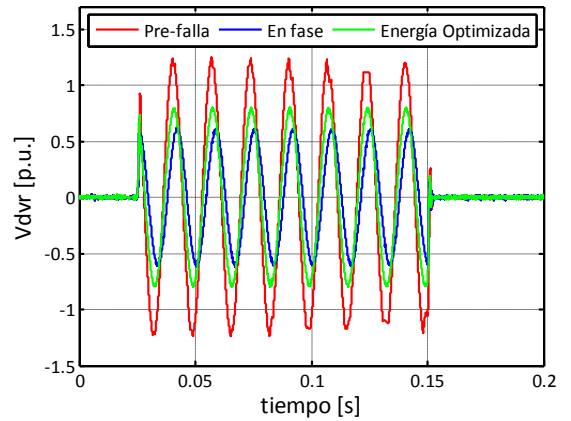
a) Compensación en Pre-falla.



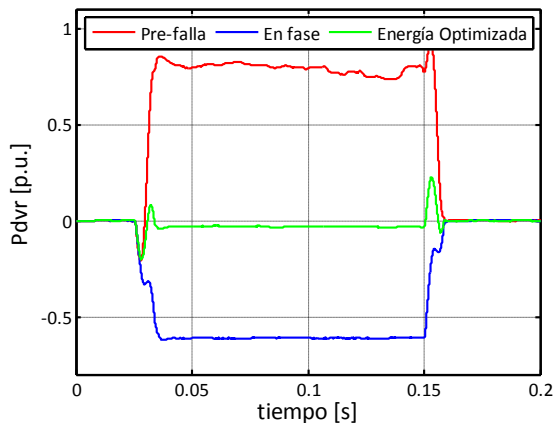
b) Compensación en Fase.



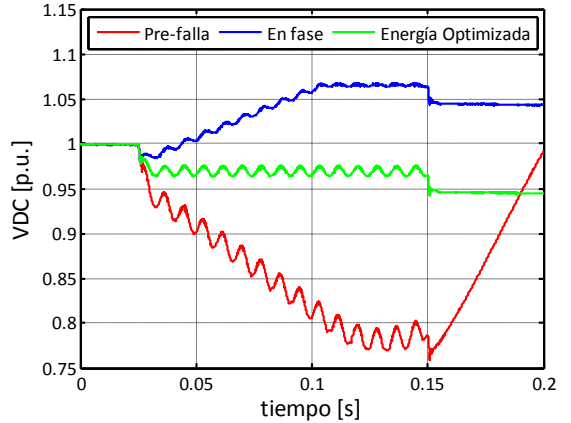
c) Compensación con energía optimizada.



d) Comparación entre tensiones inyectadas.



e) Comparación entre potencia activa inyectada.



f) Comparación de tensión en la barra de continua.

Figura 4.17. Resultados de simulación monofásica perturbación 15.

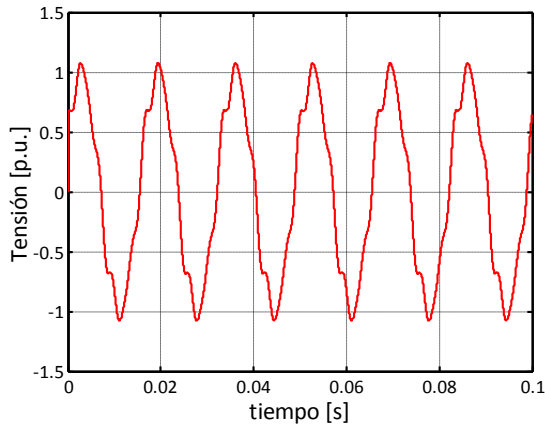
Análisis de resultados

- ✓ Para las tres estrategias de compensación implementadas el valor en magnitud de la tensión en la carga es mantenida en su valor nominal ante cualquier elevación de tensión presente en el sistema de alimentación.
- ✓ De acuerdo a las simulaciones realizadas y a las graficas de la Figura 2.26, se puede establecer que la menor tensión inyectada en la compensación de elevaciones de tensión con salto de fase diferente de cero corresponde a la estrategia de compensación en fase, mientras que la máxima tensión inyectada puede presentarse en pre-falla o energía optimizada, dependiendo de la elevación de tensión.
- ✓ En la compensación en fase de una elevación de tensión el DVR absorbe potencia del sistema de alimentación, por lo cual la tensión en la barra de continua incrementa progresivamente durante la compensación. Este incremento de tensión debe ser controlado para evitar posibles daños en el dispositivo de almacenamiento.
- ✓ En el caso de utilizar compensación en pre-falla el DVR puede entregar o absorber potencia activa (ver figuras 4.12.e y 4.13.e) del sistema de alimentación, que a su vez generan disminuciones o incrementos en la tensión de la barra de continua, con lo cual el uso de un regulador de tensión es absolutamente necesario.
- ✓ La compensación con la estrategia de energía optimizada no inyecta ni absorbe potencia activa para una elevación de tensión, siendo una muy buena opción ya que no es necesario un sistema de control para la barra de continua.
- ✓ A diferencia del caso de compensación de huecos de tensión, el salto de fase en la tensión en la carga puede ser mayor ya sea en la estrategia de compensación en fase o en la estrategia de energía optimizada.

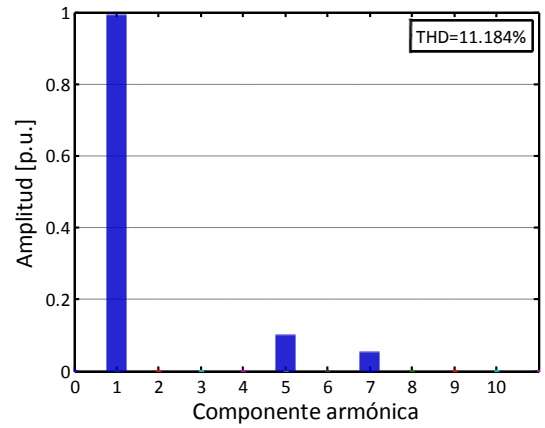
Finalmente en la Figura 4.18 se muestran los resultados de simulación para la compensación de componentes armónicas presentes en la tensión de alimentación. Los resultados corresponden a:

- Figura 4.18. a. Tensión de alimentación en PCC con:
 - Quinto armónico de amplitud de 0,1 p.u del fundamental y ángulo de fase de 15°.
 - Séptimo armónico de amplitud 0,05 p.u del fundamental y ángulo de fase de 22°.
- Figura 4.18. b. Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación.
- Figura 4.18.c. Tensión en la carga.
- Figura 4.18.d. Magnitud del espectro armónico de la tensión en la carga.
- Figura 4.18.e. Magnitud de la tensión por armónico estimada a través del filtro de Kalman.
- Figura 4.18.g. Potencia activa inyectada por el DVR en la compensación de armónicos de tensión.
- Figura 4.18.h. Tensión en la barra de continua.

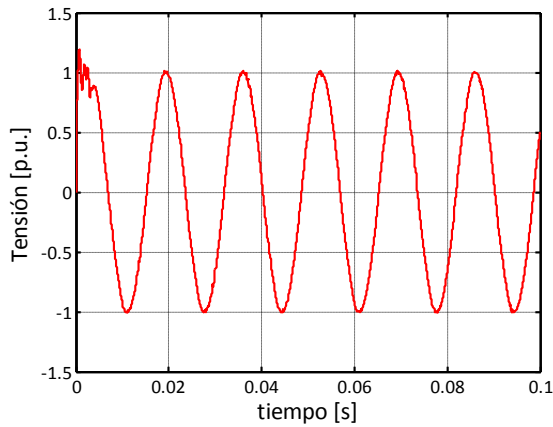
Perturbación 16. Tensión con componentes armónicas suministradas por la red de alimentación.



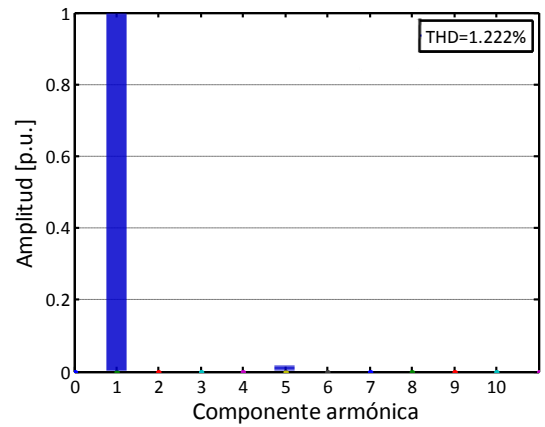
a) Tensión de alimentación.



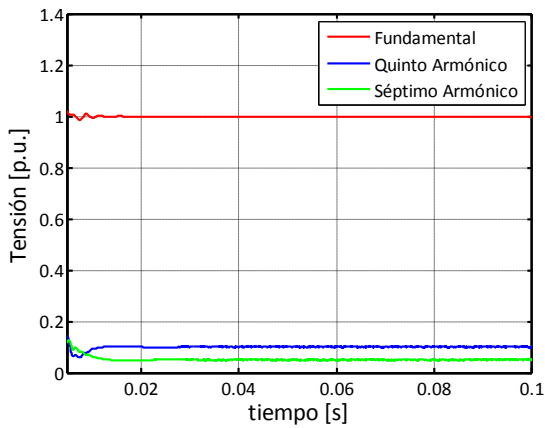
b) Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación.



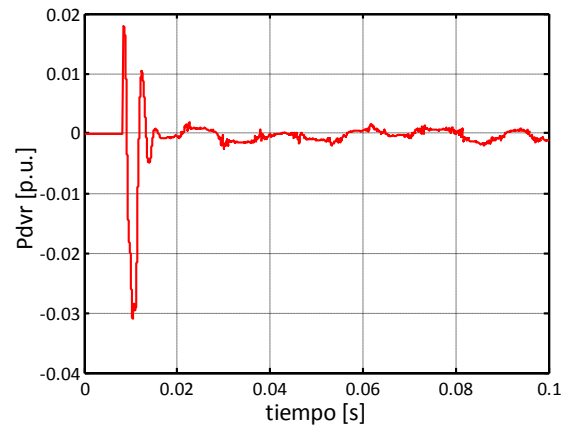
c) Tensión en la carga



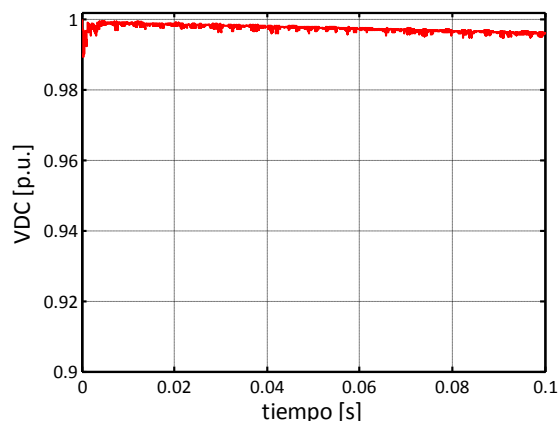
d) Magnitud del espectro armónico de la tensión en la carga



e) Magnitud de la tensión por armónico estimado a través del filtro de Kalman.



f) Potencia activa inyectada por el DVR.



g) Tensión en la barra de continua

Figura 4.18. Resultados de simulación monofásica perturbación 16.

En cuanto a la compensación de armónicos de tensión en la carga el DVR presenta resultados satisfactorios, teniendo en cuenta que mantiene la distorsión armónica total menor al 5% que es el límite permitido para un nivel tensión menor a 69 [kV]según IEEE-519 [82].

Observando la gráfica de potencia activa inyectada por el DVR se puede deducir que es aproximadamente cero, esto se debe a que en teoría al no existir corrientes de carga con componentes armónicas la potencia activa inyectada debe ser cero.

También se realizaron simulaciones en las cuales se combinan armónicos y huecos/elevaciones de tensión presente en el sistema de alimentación. Los resultados de simulación muestran que el DVR compensa en forma satisfactoria la combinación de estas perturbaciones (Ver anexo B).

4.2. Resultados y análisis de simulación para modelos trifásicos.

En las simulaciones del DVR trifásico se utilizan dos técnicas para el cálculo de las tensiones referencias, la primera utiliza la transformación *DQ0* para determinar la tensión a inyectar como se explicó en la sección 2.4.2, la cual es sincronizada a la fase A del sistema mediante un filtro de Kalman. Esta transformación es utilizada para calcular la señal de compensación en pre-falla y en fase. Para la estimación de la señal de compensación con energía optimizada es necesario utilizar tres filtros de Kalman uno por cada fase.

El tiempo de detección para una falla con el filtro de Kalman se puede observar en la Figura 4.1 analizada anteriormente. La respuesta de la transformación *DQ0* ante cualquier tipo de perturbación es casi instantánea, aunque es necesario tener en cuenta que puede verse sometida a ligeros retardos debido a la técnica de sincronización utilizada.

En la Figura 4.19 se puede observar la respuesta de la transformación *DQ0* en condiciones normales para el sistema y ante un hueco de tensión bifásico de 0,3 en p.u. en la tensión de alimentación entre 25 [ms] y 150 [ms].

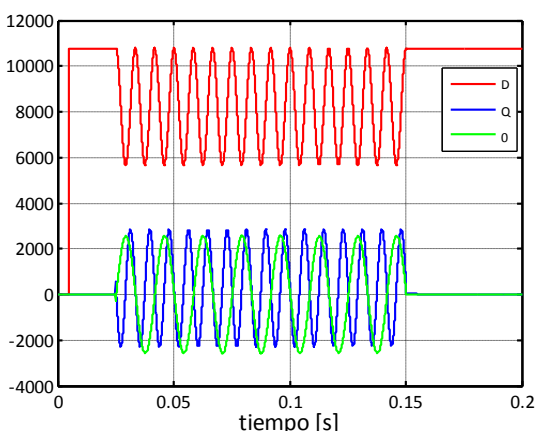


Figura 4.19. Transformada DQ0 ante una perturbación.

A continuación se presentan los resultados de simulación para huecos de tensión correspondientes al modelo trifásico del DVR. Para facilitar el análisis y las comparaciones entre de cada una de las estrategias de compensación en las siguientes figuras se presentan los resultados de simulación correspondientes a:

- Figura 4.20.a. Tensión de alimentación en Pcc de cada una de las fases del sistema.
- Figura 4.20.b. Tensión inyectada por fase por el DVR en compensación pre-falla.
- Figura 4.20.c. Potencia activa inyectada por el DVR en compensación pre-falla.
- Figura 4.20.d. Tensión compensada en la carga por fase compensación pre-falla.
- Figura 4.20.e. Tensión inyectada por fase por el DVR compensación en fase.
- Figura 4.20.f. Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en fase.
- Figura 4.20.g. Tensión compensada en la carga por fase compensación en fase.
- Figura 4.20.h. Tensión inyectada por fase por el DVR compensación energía optimizada.
- Figura 4.20.i. Potencia activa inyectada por el DVR compensación energía optimizada.
- Figura 4.20.j. Tensión en la carga compensada por fase compensación energía optimizada.
- Figura 4.20.k. Tensión en la barra de continua.

Los resultados de la simulación se presentan en p.u de acuerdo a las siguientes bases:

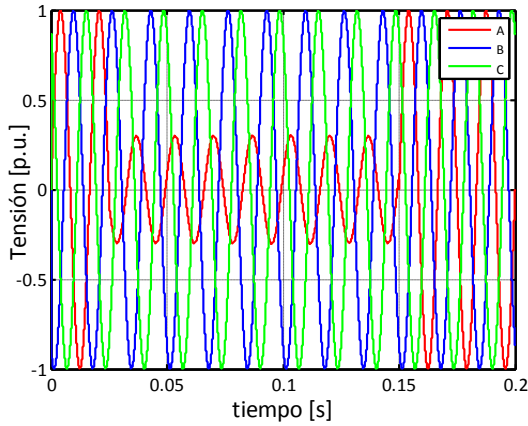
Tensión de línea base 13,2 kV.

Potencia activa base de 128 kW.

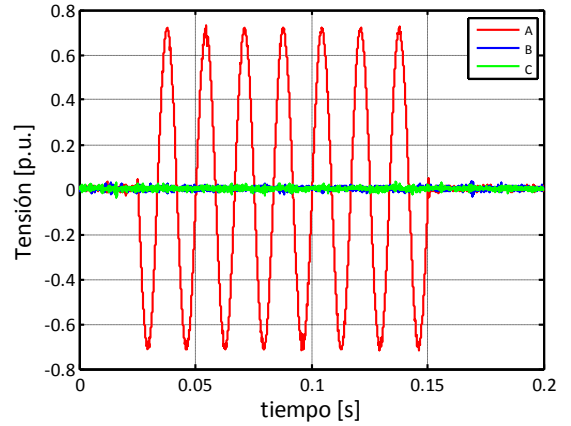
Tensión de continua base 1500 V.

El hueco de tensión para todos los caso inicia en 0,025 segundos y finaliza en 0,15 segundos. Para cada hueco de tensión simulado las fases bajo falla tienen igual caída de tensión y salto de fase.

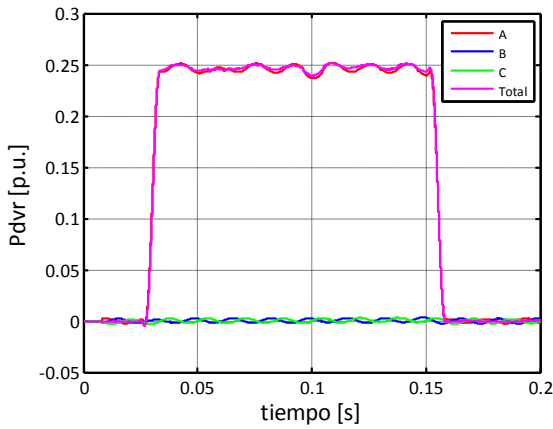
Perturbación 1. Huevo de tensión monofásico fase A de 0,7 p.u y salto de fase de 15°



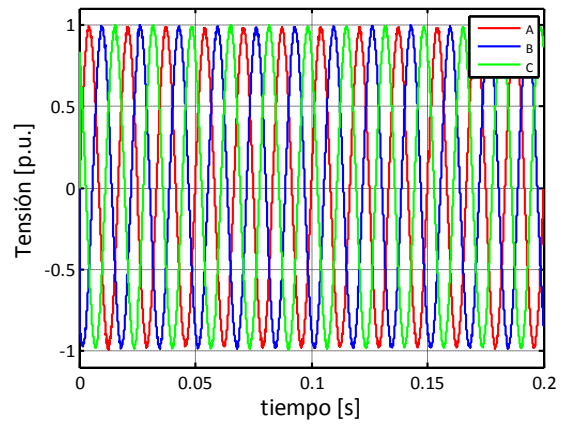
a) Tensión en PCC.



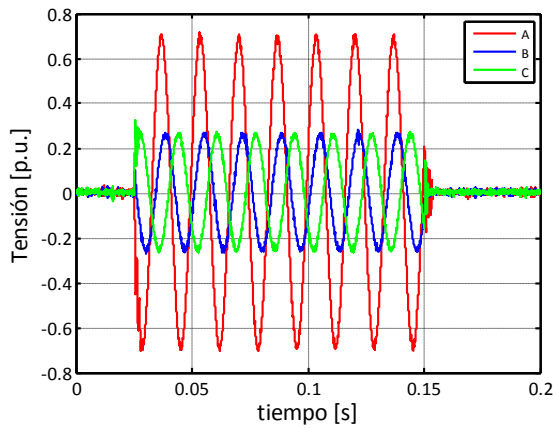
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



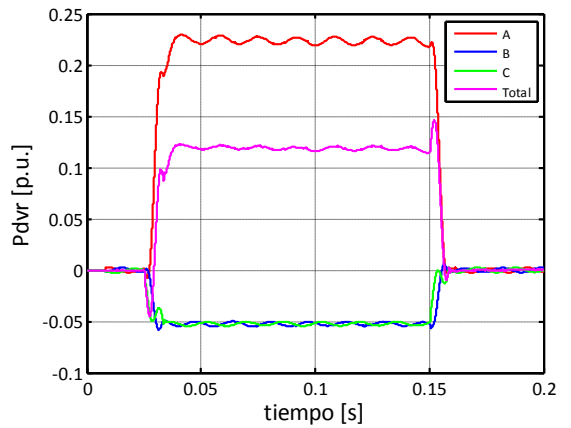
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



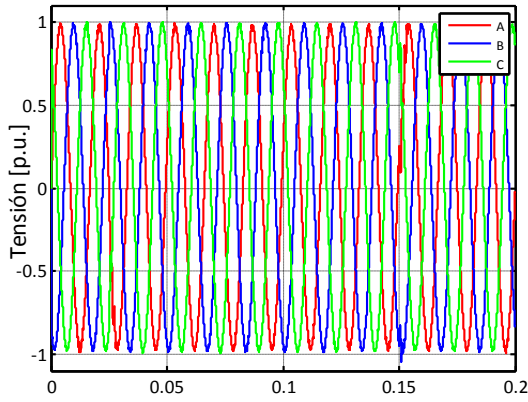
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



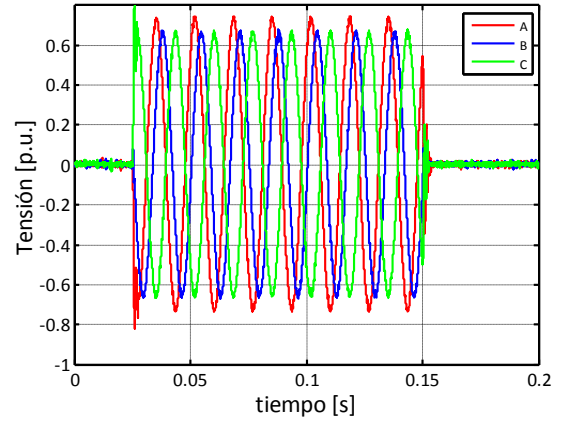
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



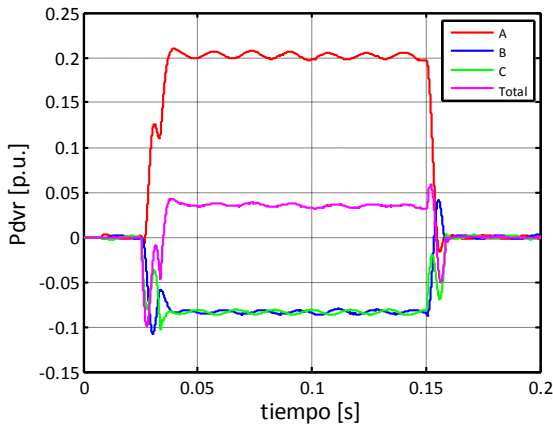
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



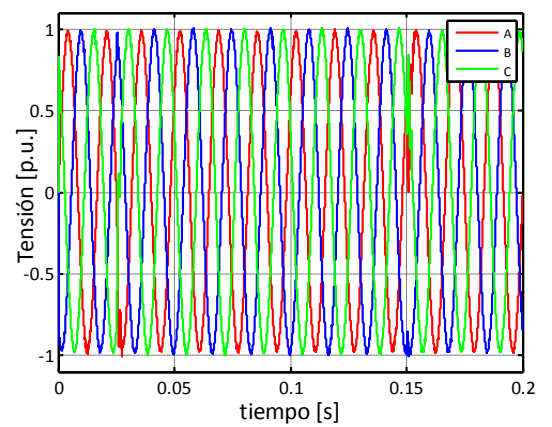
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



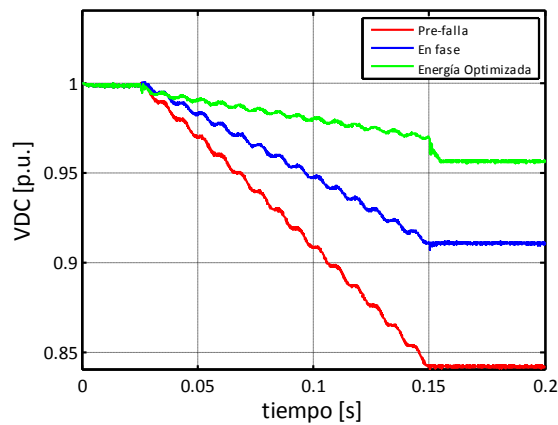
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



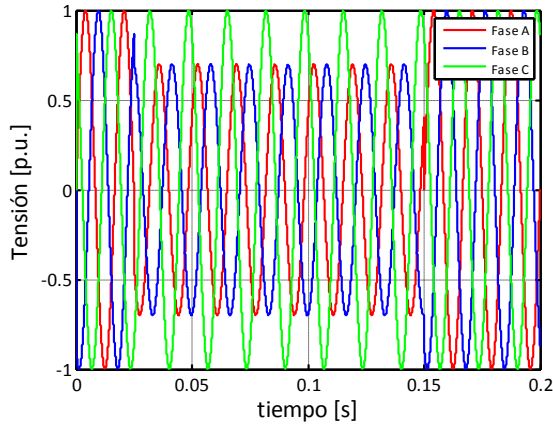
j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.



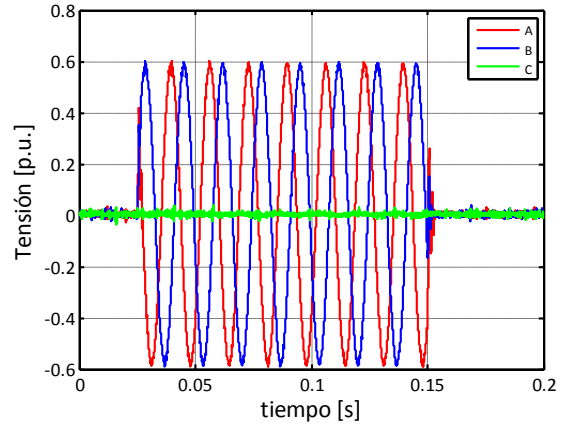
k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias.

Figura 4.20. Resultados de simulación trifásica perturbación 1.

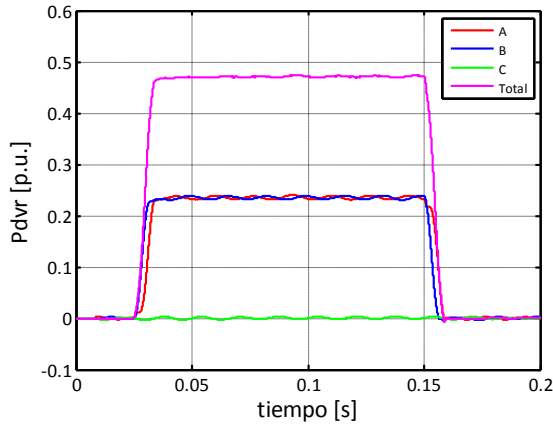
Perturbación 2. Huevo de tensión bifásico Fase A y B de 0,3 p.u. y salto de fase de 35°



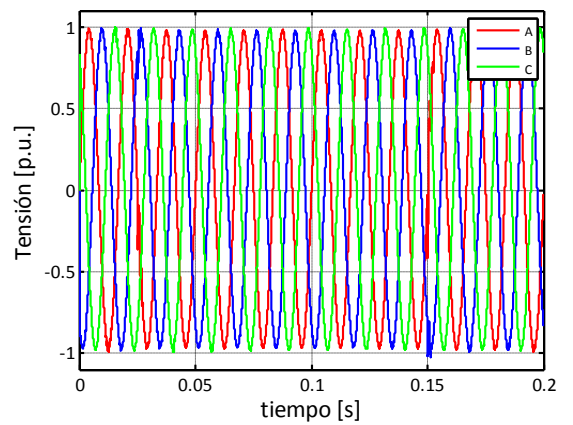
a) Tensión en PCC.



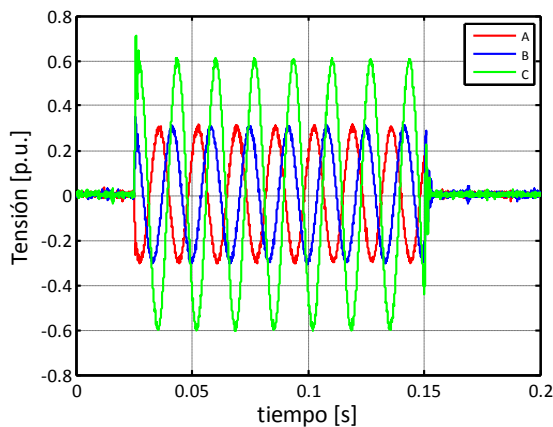
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



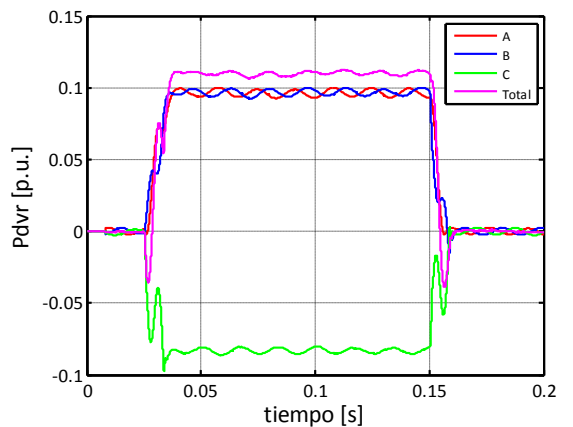
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



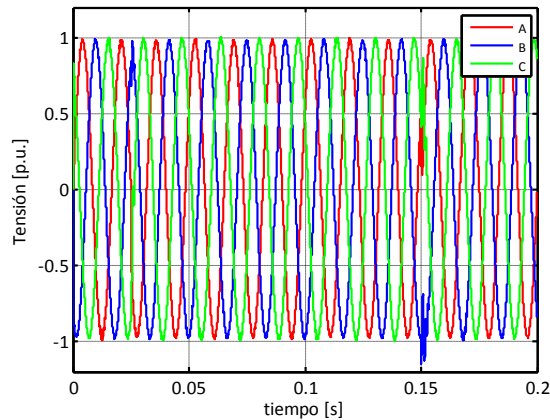
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



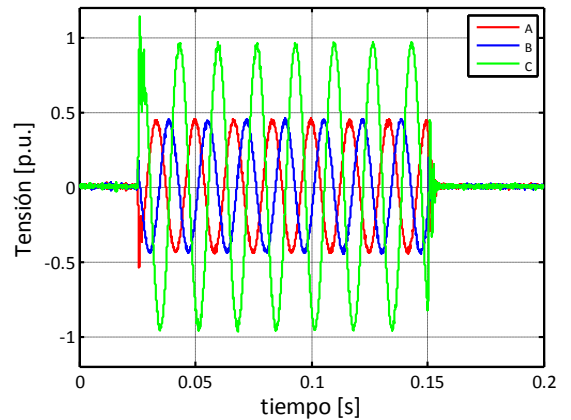
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



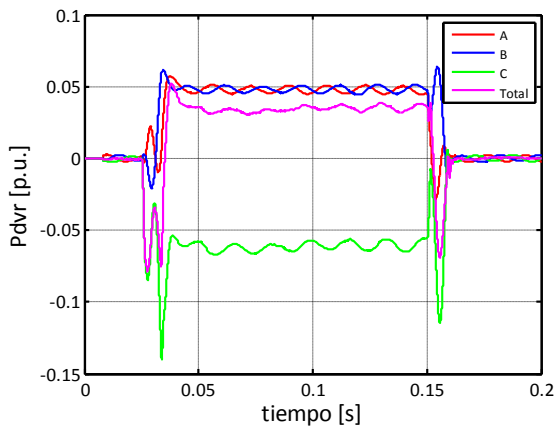
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



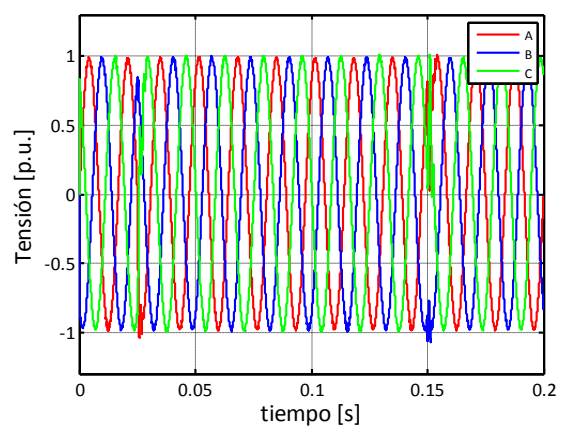
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



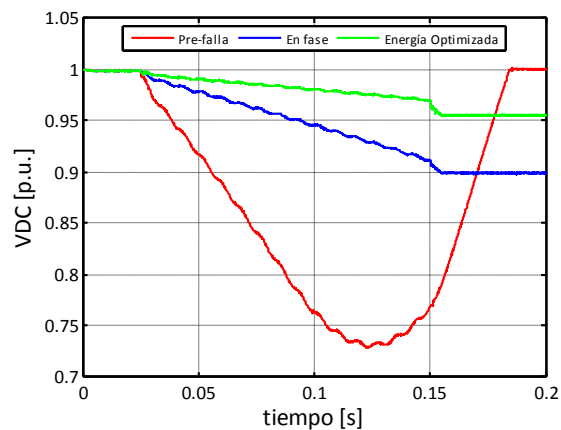
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.

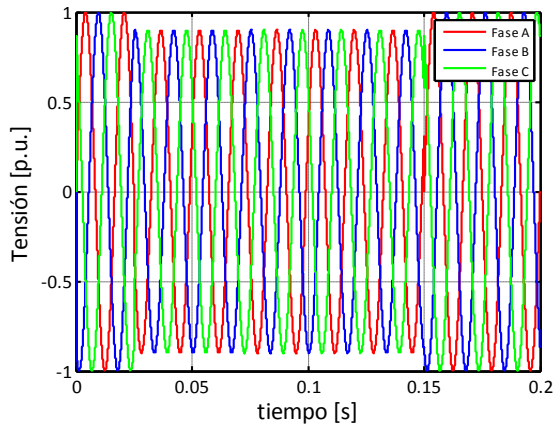


j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.

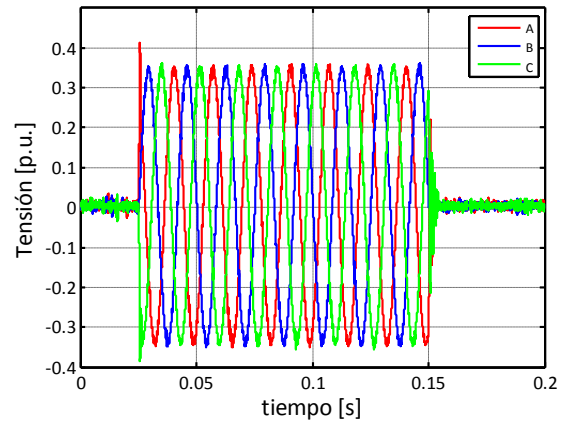


k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias
Figura 4.21. Resultados de simulación trifásica perturbación 2

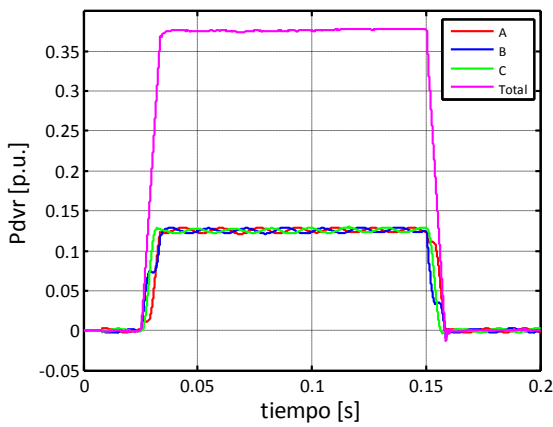
Perturbación 3. Huevo de tensión trifásico de 0,1 p.u. y salto de fase de 20°.



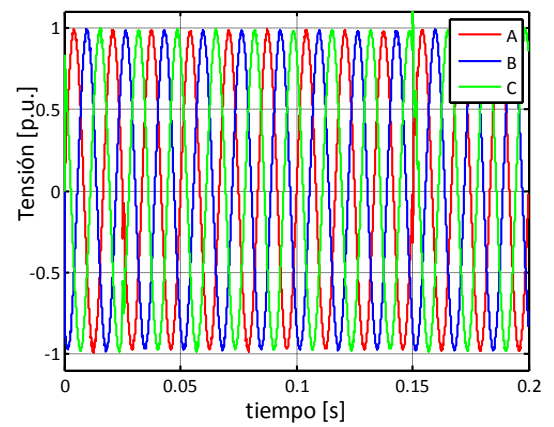
a) Tensión en PCC.



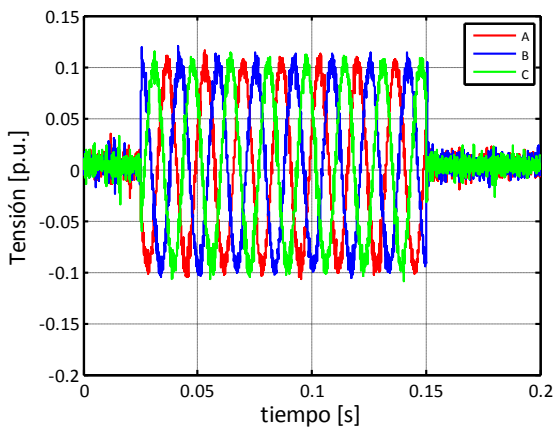
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



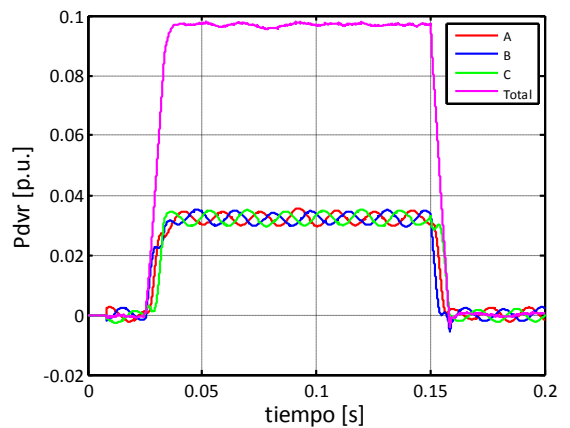
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



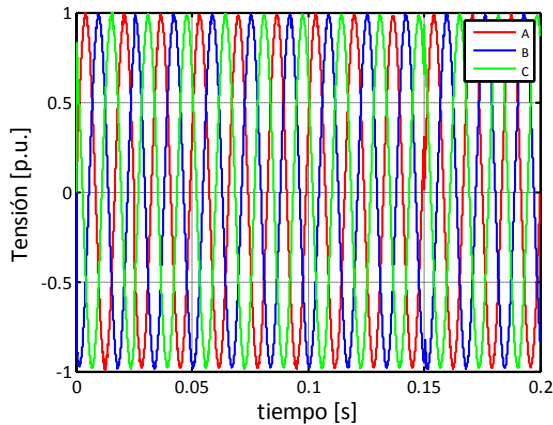
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



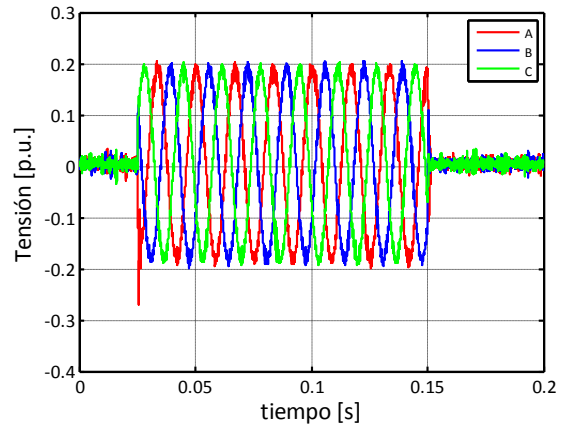
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



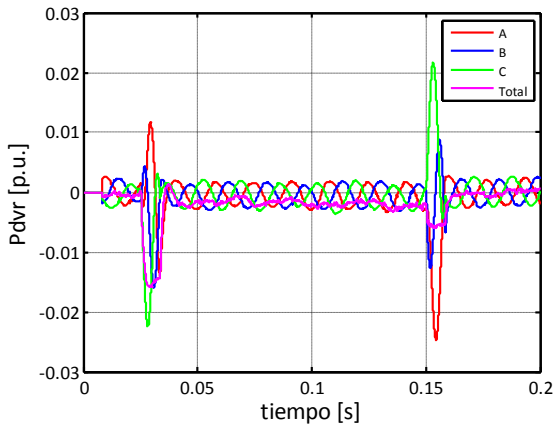
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



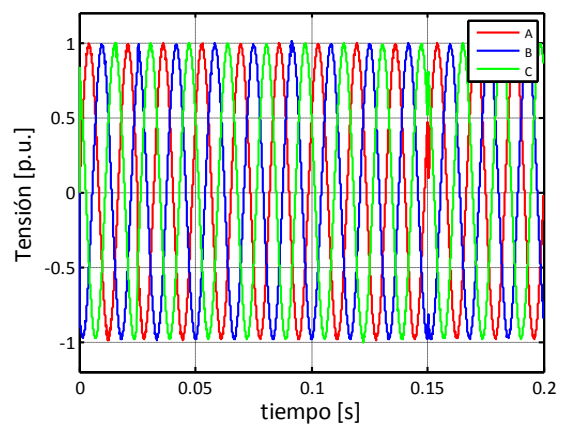
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



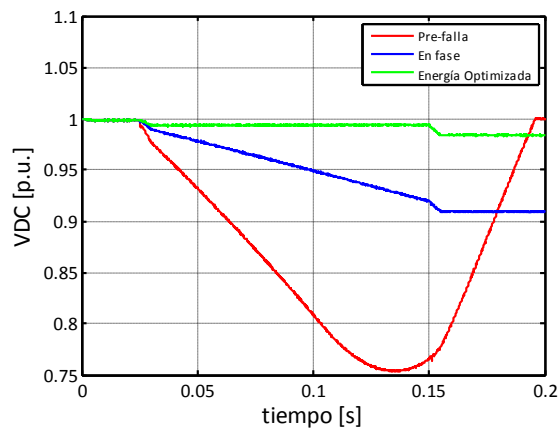
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.



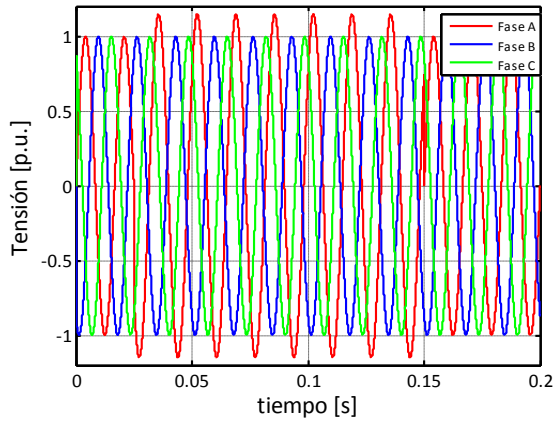
**k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias
Figura 4.22. Resultados de simulación trifásica perturbación 3.**

Análisis de resultados

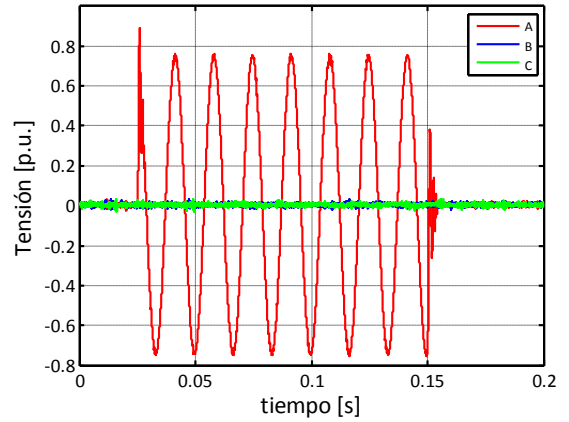
- ✓ Al observar las gráficas de tensión en la carga para los diferentes tipos de huecos de tensión simulados se puede verificar la efectividad del DVR como dispositivo de compensación con cada una de las estrategias implementadas.
- ✓ Para la compensación de huecos monofásicos, bifásicos o trifásicos utilizando la estrategia de compensación en pre-falla las tensiones a inyectar por fase en p.u son iguales a las obtenidas en el modelo monofásico, ya que cada fase se comporta como un sistema independiente.
- ✓ La potencia inyectada por la compensación en pre-falla será igual a la potencia inyectada en el modelo monofásico multiplicado por el número de fases falladas.
- ✓ En la compensación en fase de huecos trifásicos la tensión y la potencia inyectada en p.u por cada fase corresponden a los mismos valores del caso monofásico.
- ✓ De acuerdo a los resultados de simulación y a las gráficas de la Figura 2.25 se puede establecer que en el caso de compensación de huecos trifásicos la menor tensión inyectada por fase corresponde a la estrategia de compensación en fase. La mayor tensión inyectada puede presentarse en la compensación pre-falla o energía optimizada dependiendo del hueco de tensión.
- ✓ En la compensación de huecos monofásicos y bifásicos con salto de fase diferente de cero utilizando la estrategia de compensación en fase el DVR debe inyectar tensión en las fases que no presentan falla. Esto con el objetivo de mantener un sistema equilibrado en tensión.
- ✓ Para todos los casos de huecos de tensión la estrategia de compensación de energía optimizada inyecta la mínima potencia activa.
- ✓ La estrategia de compensación que necesita inyectar mayor potencia para huecos de tensión con salto de fase diferente de cero es la de compensación en pre-falla. En la compensación en fase se debe tener en cuenta que el DVR puede entregar o absorber potencia dependiendo del hueco de tensión.
- ✓ La potencia activa total necesaria para la compensación en fase de huecos de tensión monofásicos o bifásicos, podrá ser para estos casos entregada o absorbida ya que mientras alguna de las fases inyecta potencia activa al sistema, las demás pueden absorber potencia activa del mismo.

A continuación en las figuras 4.23 a 4.25 se presentan los resultados de simulación para elevaciones de tensión correspondientes al modelo trifásico del DVR. Para facilitar el análisis y las comparaciones entre de cada una de las estrategias de compensación los resultados se muestran siguiendo la misma estructura de las gráficas para huecos de tensión y se conservan las mismas bases para trabajar los valores en p.u.

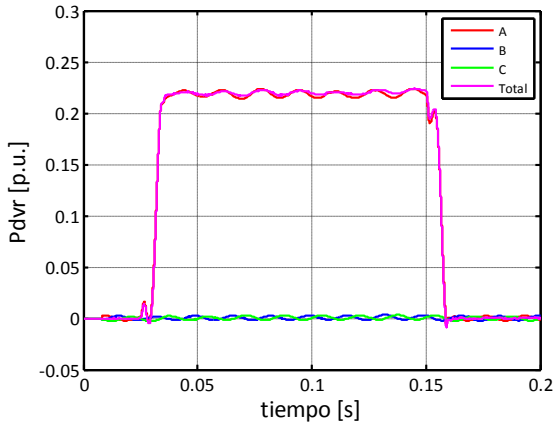
Perturbación 4. Elevación de tensión monofásica en la fase A de 0,15 p.u y salto de fase de 40 °.



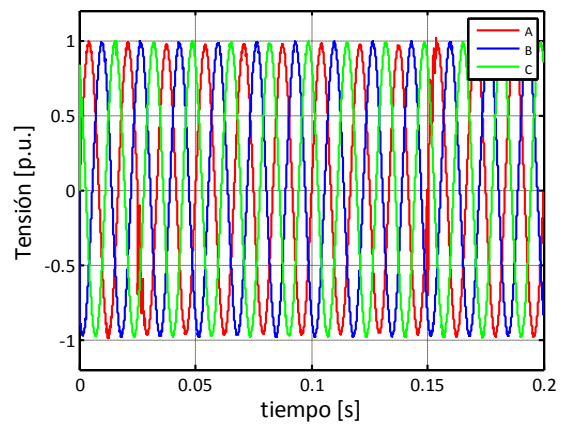
a) Tensión en PCC.



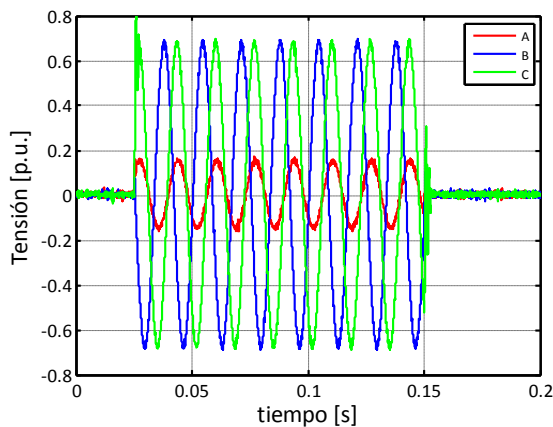
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



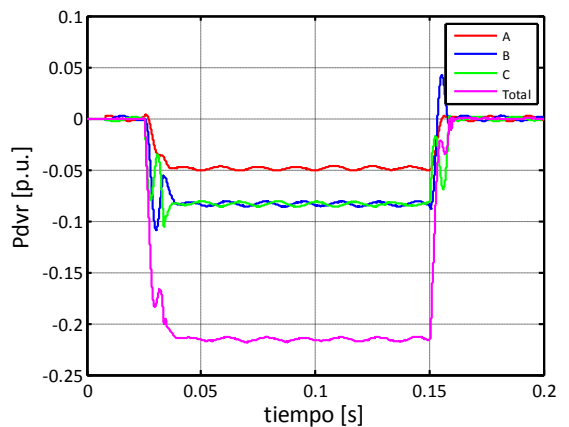
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



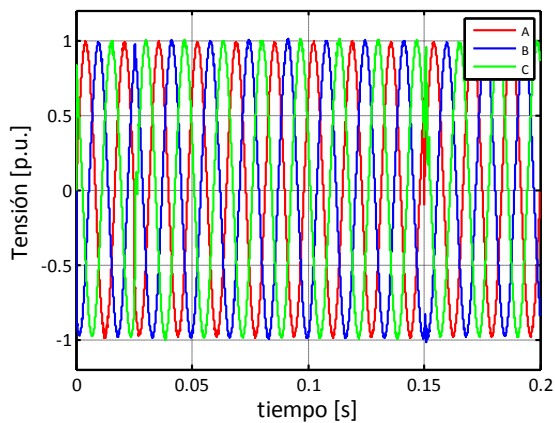
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



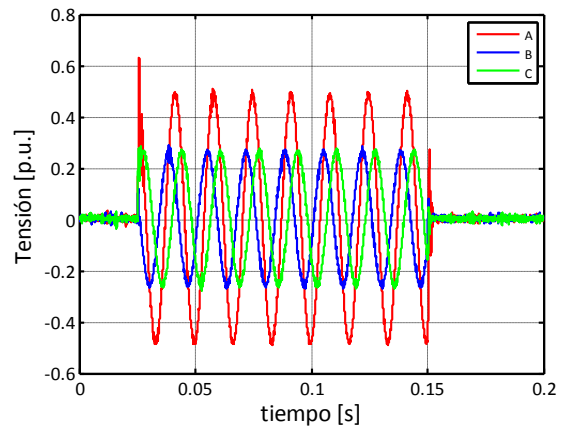
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



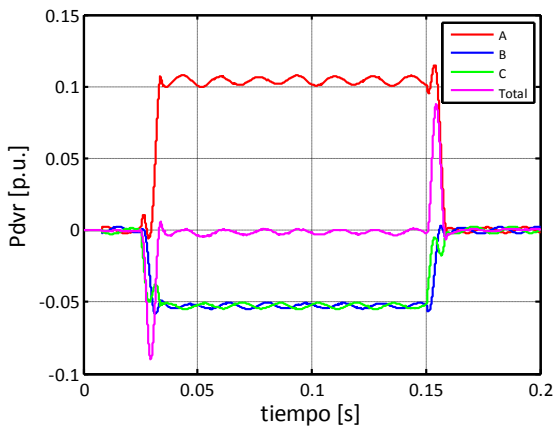
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



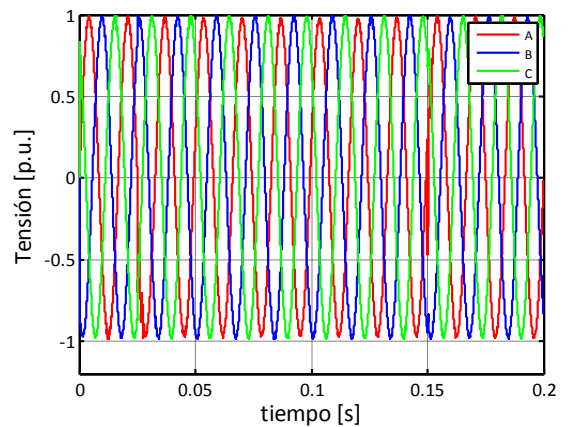
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



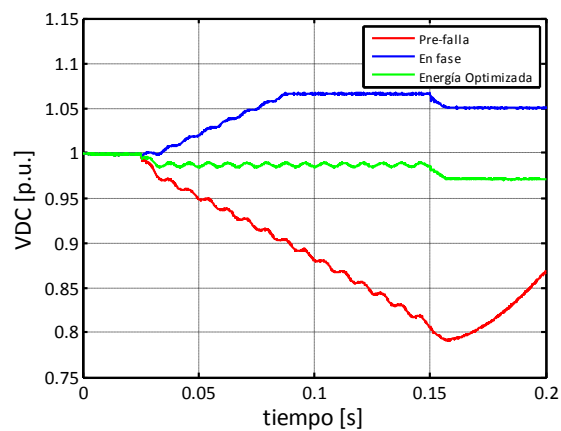
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.

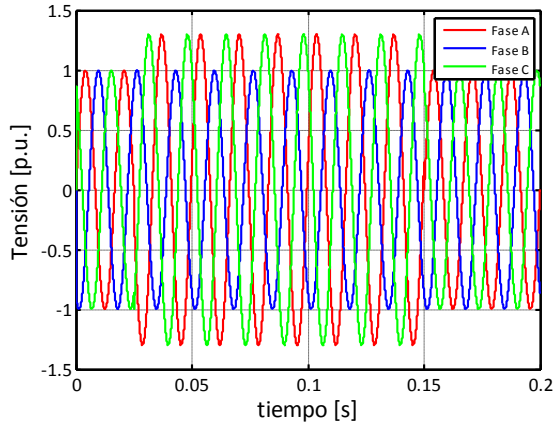


j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.

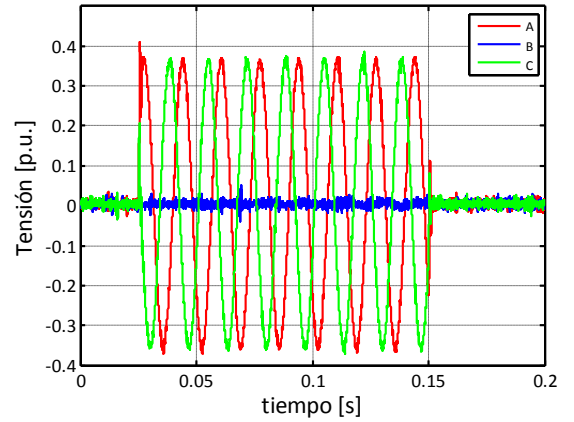


**k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias
Figura 4.23. Resultados de simulación trifásica perturbación 4.**

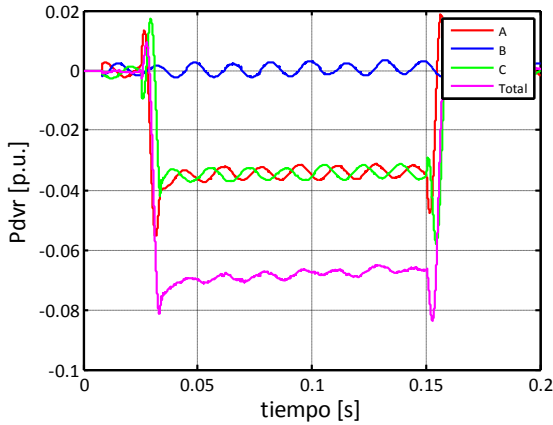
Perturbación 5. Elevación de tensión bifásica en las fases A y B de 0,3 p.u. y salto de fase de 10 °.



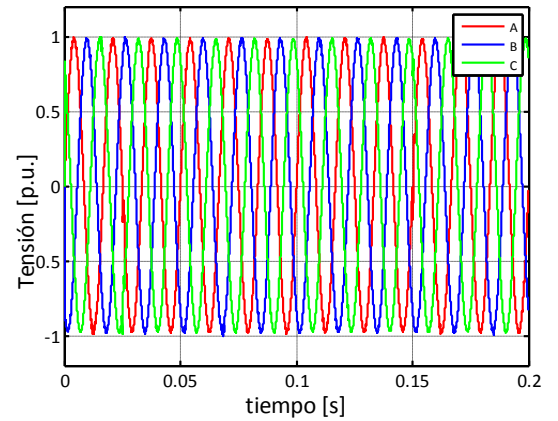
a) Tensión en PCC.



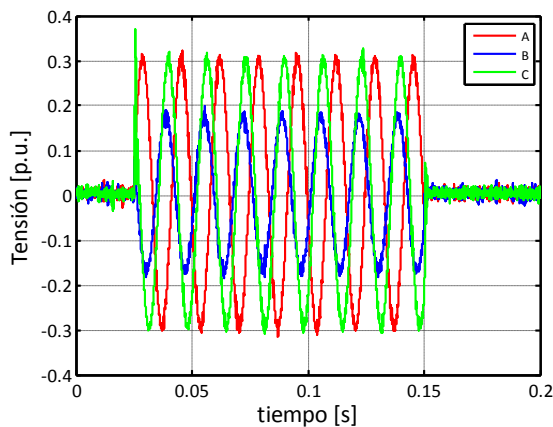
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



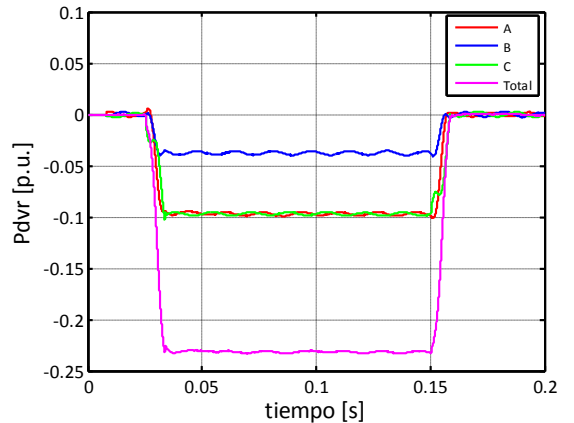
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



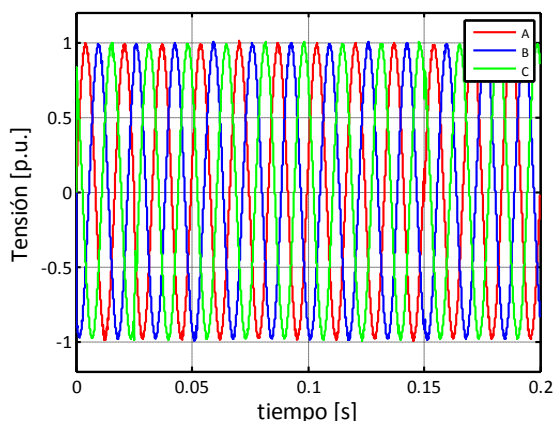
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



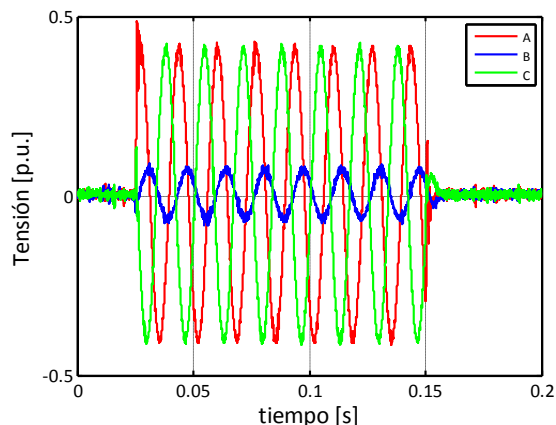
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



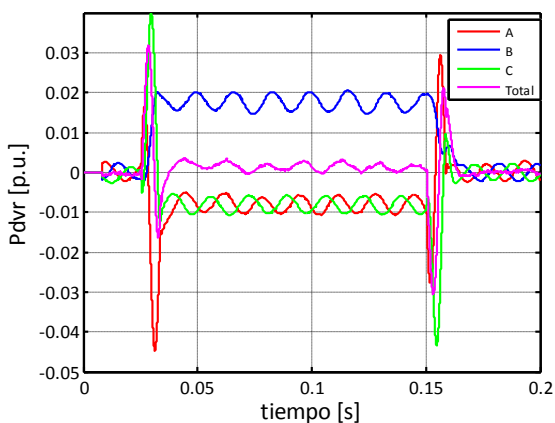
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



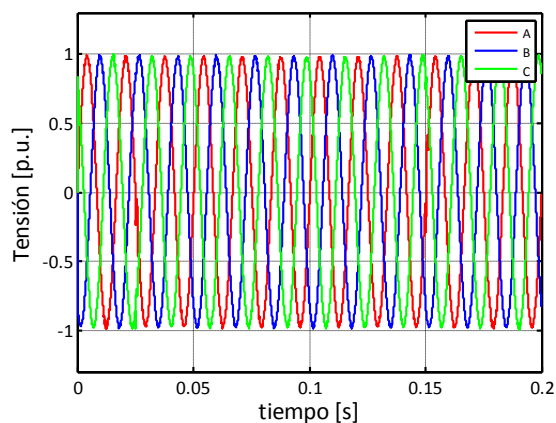
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



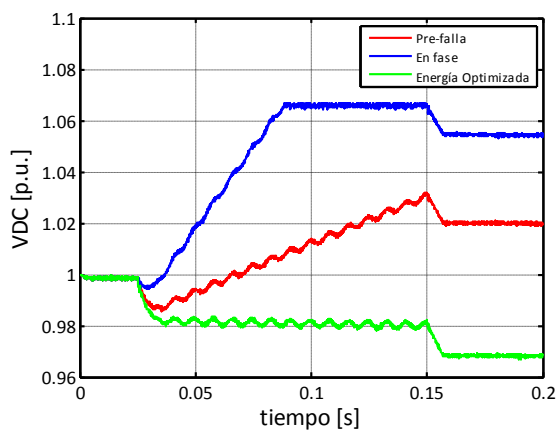
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



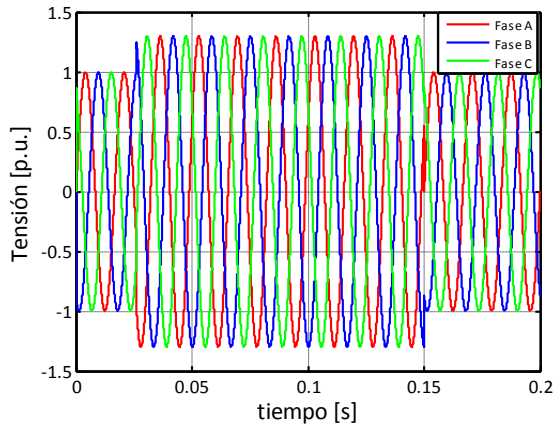
j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.



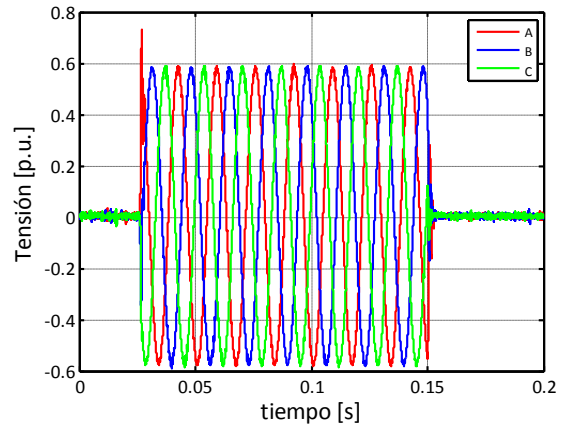
k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias.

Figura 4.24. Resultados de simulación trifásica perturbación 5.

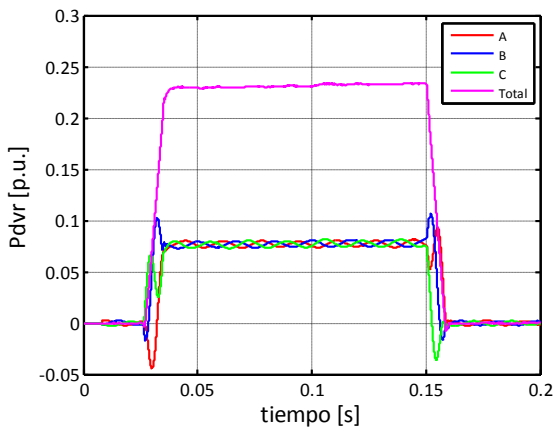
Perturbación 6. Elevación de tensión trifásica de 0,3 p.u. y salto de fase de 25 °.



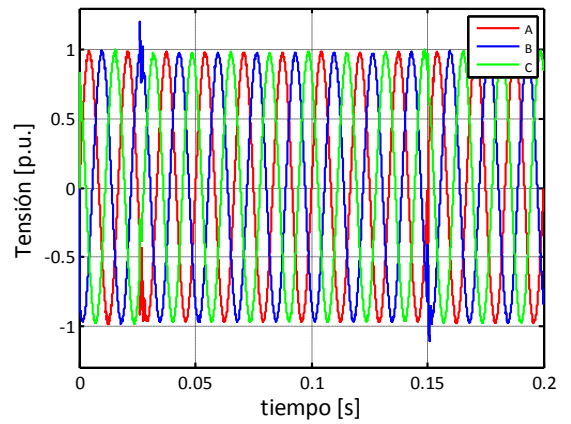
a) Tensión en PCC.



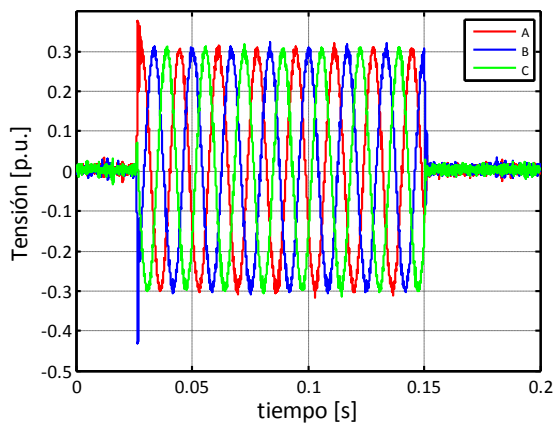
b) Tensión inyectada por el DVR compensación en Pre-falla.



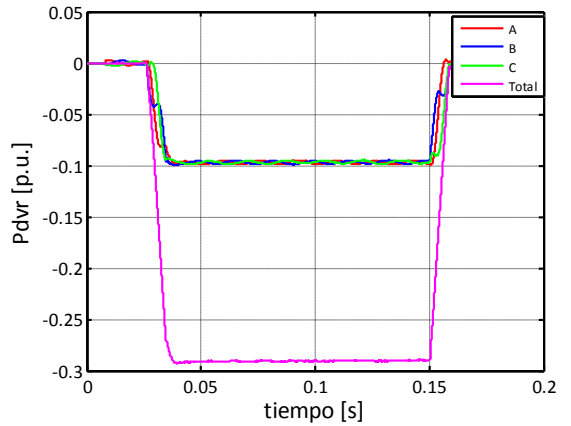
c) Potencia activa inyectada por el DVR compensación en pre-falla.



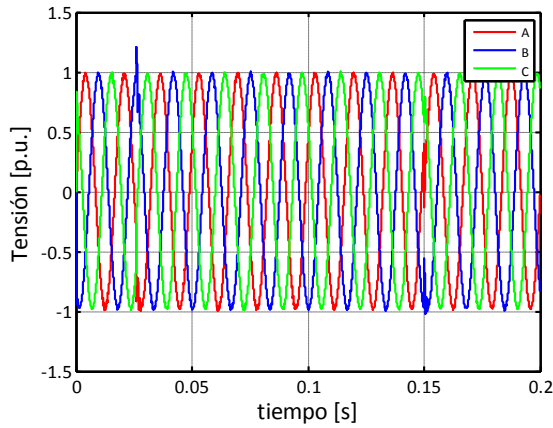
d) Tensión en la carga compensación Pre-falla.



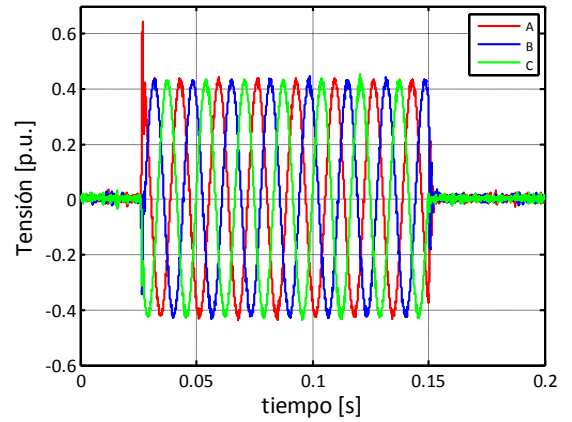
e) Tensión inyectada por el DVR compensación en Fase.



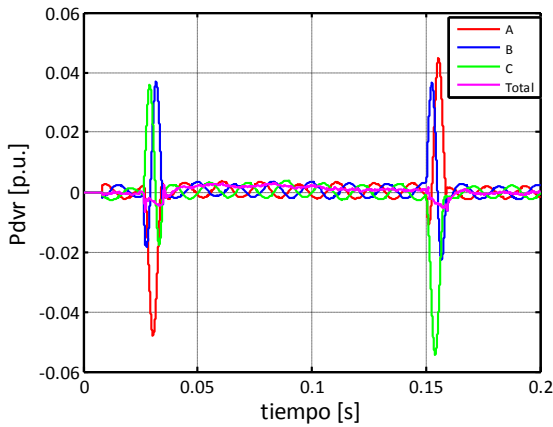
f) Potencia activa inyectada por el DVR en compensación en Fase.



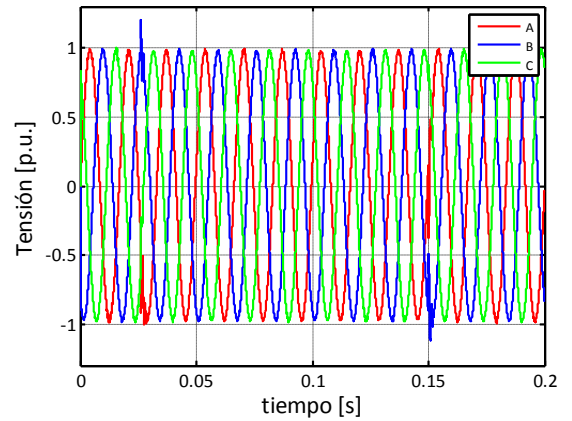
g) Tensión en la carga compensación en Fase.



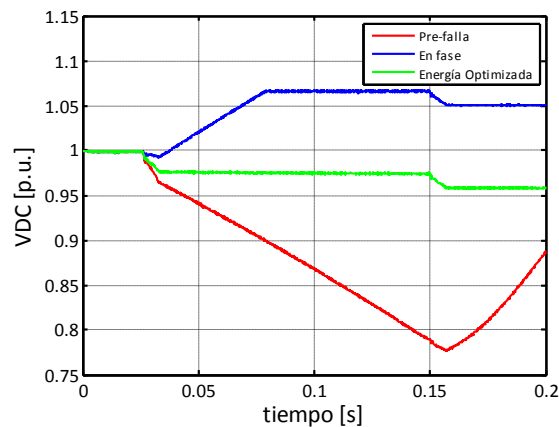
h) Tensión inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



i) Potencia activa inyectada por el DVR compensación con energía optimizada.



j) Tensión en la carga compensación con energía optimizada.



k) comparación de tensión en la barra de continua para las diferentes estrategias.

Figura 4.25. Resultados de simulación trifásica perturbación 6.

Análisis de resultados

- ✓ Al observar las gráficas de tensión en la carga para los diferentes tipos de elevaciones de tensión simulados se puede verificar la efectividad del DVR como dispositivo de compensación con cada una de las estrategias implementadas.
- ✓ Para la compensación de elevaciones monofásicas, bifásicas o trifásicas utilizando la estrategia de compensación pre-falla las tensiones a inyectar por fase en p.u son iguales a las obtenidas en el modelo monofásico, ya que cada fase se comporta como un sistema independiente.
- ✓ La potencia inyectada por la compensación en pre-falla será igual a la potencia inyectada en el modelo monofásico multiplicado por el número de fases falladas.
- ✓ En la compensación en fase de elevaciones trifásicas la tensión y la potencia inyectada en p.u por cada fase corresponden a los mismos valores del caso monofásico.
- ✓ De acuerdo a los resultados de simulación y a las gráficas de la Figura 2.26 se puede establecer que el caso de compensación de elevaciones trifásicos la menor tensión inyectada por fase corresponde a la estrategia de compensación en fase. La mayor tensión inyectada puede presentarse en la compensación pre-falla o energía optimizada dependiendo del hueco de tensión.
- ✓ En la compensación de elevaciones monofásicas y bifásicas con salto de fase diferente de cero utilizando la estrategia de compensación en fase el DVR debe inyectar tensión en las fases que no presentan falla. Esto con el objetivo de mantener un sistema equilibrado en tensión.
- ✓ Para todos los casos de elevaciones de tensión la estrategia de compensación de energía optimizada inyecta cero potencia activa.
- ✓ En la estrategia de compensación en pre-falla el DVR puede entregar o absorber potencia activa del sistema. En el caso de absorber potencia es menor que en la compensación en fase.
- ✓ Observando las gráficas de la tensión en la barra de continua se puede verificar la efectividad del control implementado teniendo en cuenta que la tensión se mantiene dentro del rango especificado entre -20% y el 5% de la tensión nominal.

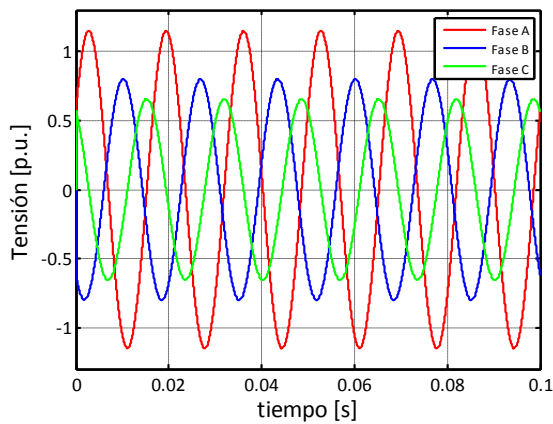
En la Figura 4.26 se muestran los resultados de simulación para un desequilibrio permanente del 33% calculado a partir de la ecuación (1.2). Los resultados corresponden a:

- Figura 4.26.a. Tensión de alimentación en PCC.
- Figura 4.26.b. Tensión inyectada por el DVR fase A.
- Figura 4.26.c. Tensión inyectada por el DVR fase B.
- Figura 4.26.d. Tensión inyectada por el DVR fase C.

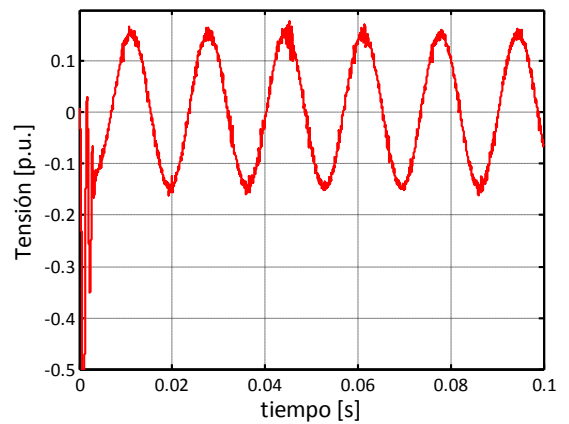
- Figura 4.26.e. Potencia activa inyectada por el DVR.
- Figura 4.26.f. Tensión en la barra de continua.

Para el cálculo de las señales de referencia se utiliza un filtro de Kalman junto con la transformación DQ0.

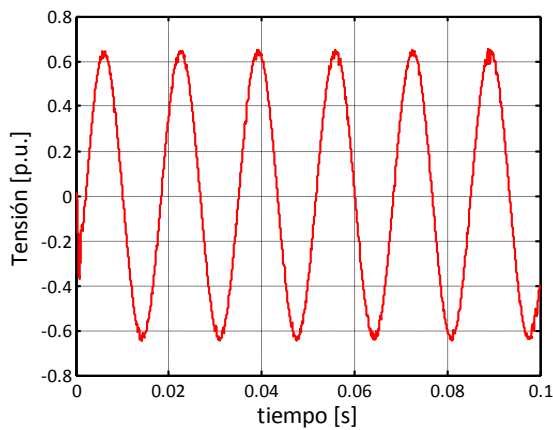
Perturbación 7. Desequilibrio en tensión trifásico.



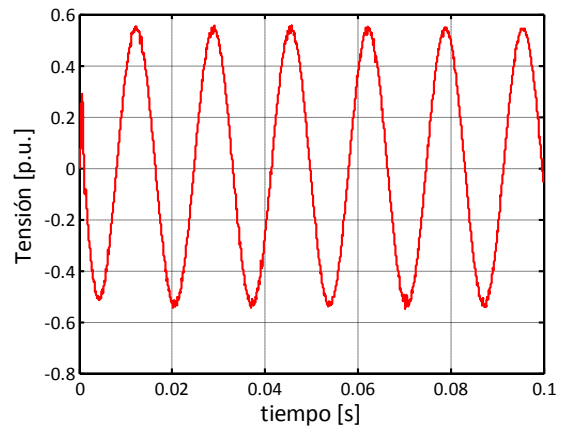
a) Tensión en PCC.



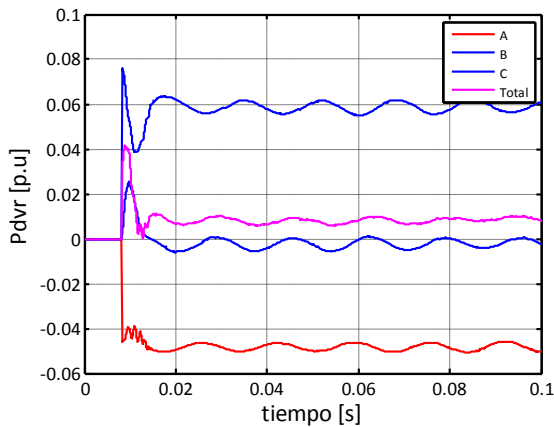
b) Tensión inyectada por el DVR fase A.



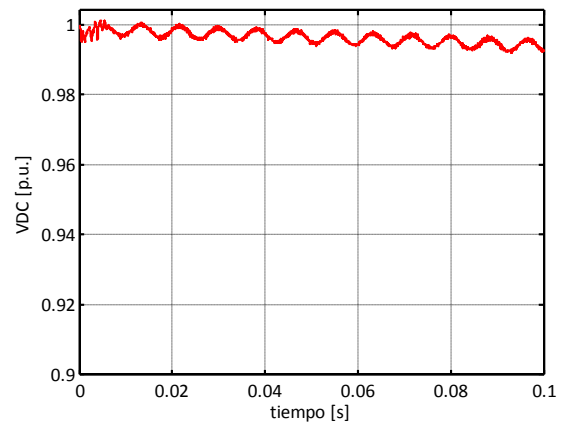
c) Tensión inyectada por el DVR fase B.



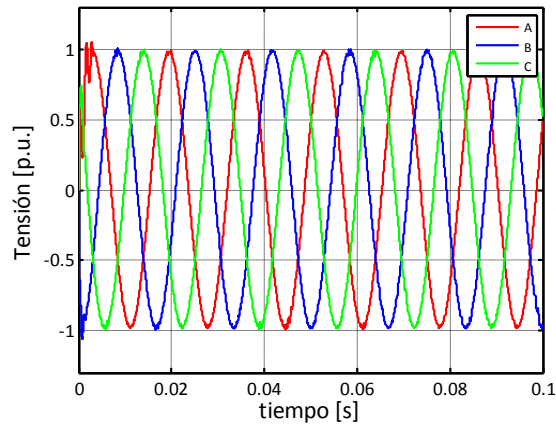
d) Tensión inyectada por el DVR fase C.



e) Potencia activa inyectada por el DVR.



f) Tensión en la barra de continua.



e) Tensión en la carga compensación en fase.

Figura 4.26. Resultados de simulación trifásica perturbación 7.

Análisis de resultados

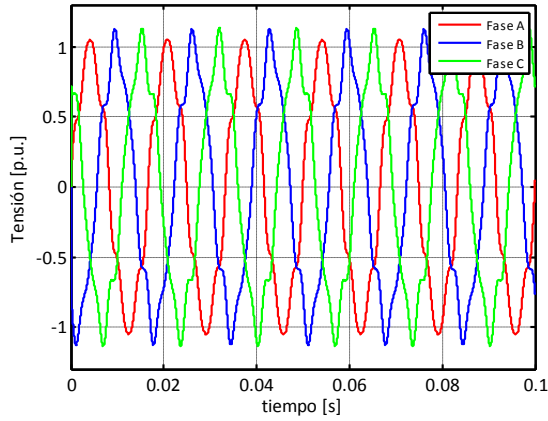
- ✓ De acuerdo a las gráficas anteriores se puede verificar la efectividad del DVR para compensar desequilibrios de tensión. En caso de que el desequilibrio sea permanente el DVR debe inyectar potencia activa en todo momento, por tanto la unidad de almacenamiento de energía debe tener una capacidad de almacenamiento considerable.

Finalmente en la Figura 4.27 se muestran los resultados de simulación para la compensación de componentes armónicas presentes en la tensión de alimentación. Los resultados corresponden a:

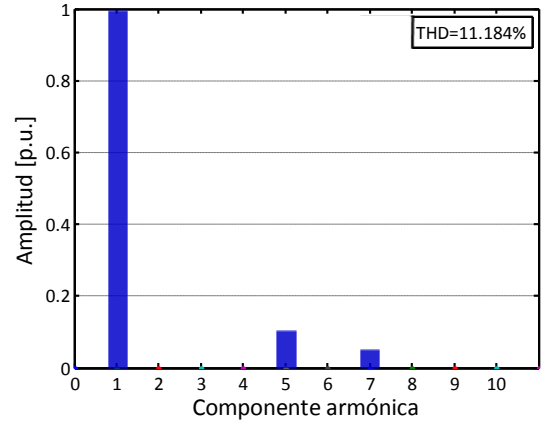
- Figura 4.27.a. Tensión de alimentación en PCC :
 - Fase A:
 - Quinto armónico de amplitud de 0,1 p.u del fundamental y ángulo de fase de 15°.

- Séptimo armónico de amplitud 0,05 p.u del fundamental y ángulo de fase de 22° .
- Fase B:
 - Quinto armónico de amplitud de 0,1 p.u del fundamental y ángulo de fase de -105° .
 - Séptimo armónico de amplitud 0,05 p.u del fundamental y ángulo de fase de -98° .
- Fase C:
 - Quinto armónico de amplitud de 0,1 p.u. del fundamental y ángulo de fase de -135° .
 - Séptimo armónico de amplitud 0,05 p.u. del fundamental y ángulo de fase de 142° .
- Figura 4.27.b. Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación por fase.
- Figura 4.27.c. Tensión inyectada por el DVR fase A.
- Figura 4.27.d. Tensión inyectada por el DVR fase B.
- Figura 4.27.e Tensión inyectada por el DVR fase C.
- Figura 4.27.f Potencia activa inyectada por el DVR.
- Figura 4.27.g Tensión en la barra de continua.
- Figura 4.27.h. Tensión compensada en la carga.
- Figura 4.27.i. Magnitud del espectro armónico de la tensión de la carga por fase.

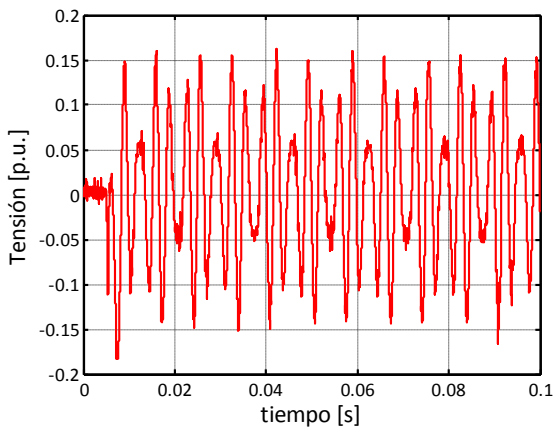
Perturbación 8. Armónicos de tensión suministrados permanentemente por la red de alimentación.



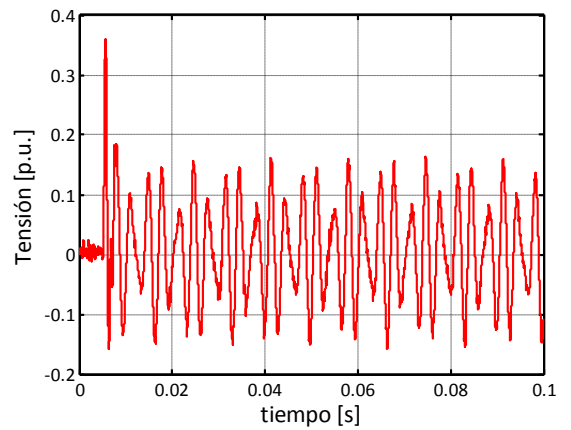
a) Tensión de alimentación.



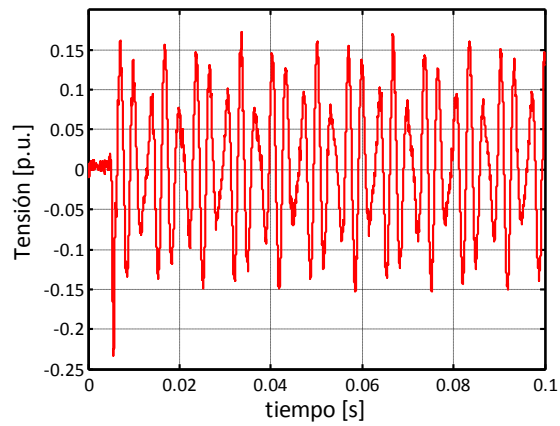
b) Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación por fase.



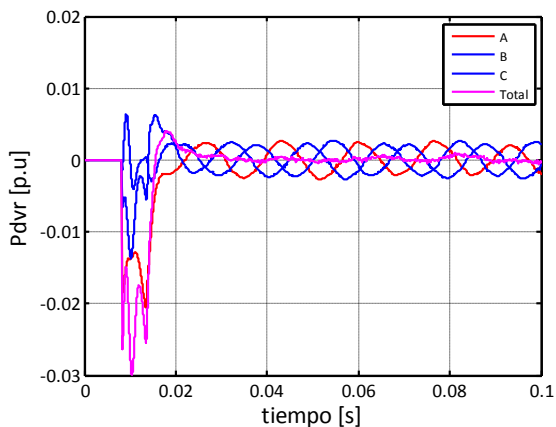
c) Tensión inyectada por el DVR fase A.



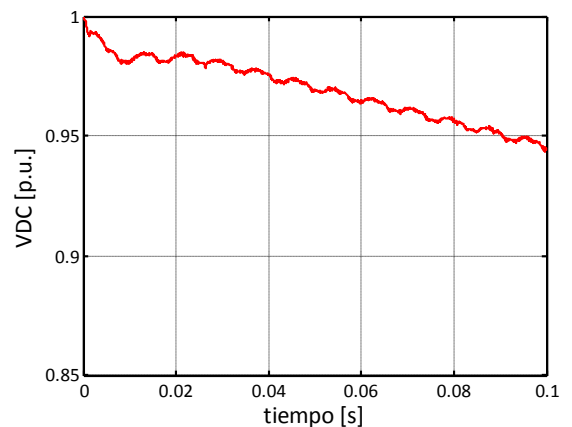
d) Tensión inyectada por el DVR fase B.



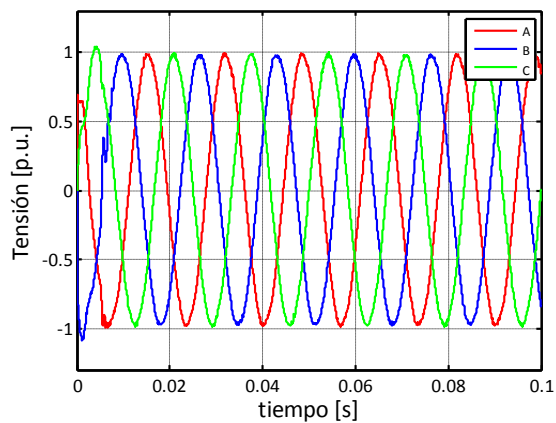
e) Tensión inyectada por el DVR fase C.



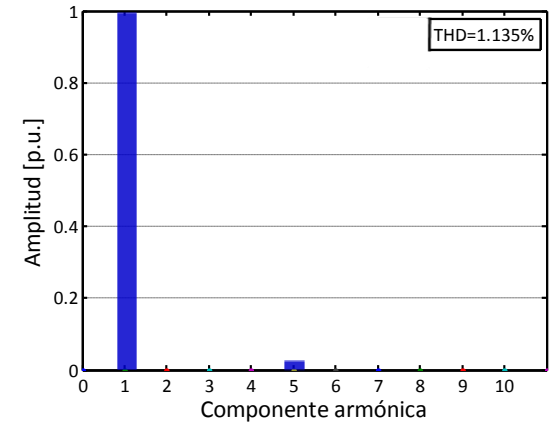
f) Potencia activa inyectada por el DVR.



g) Tensión en la barra de continua



h) Tensión en la carga compensada.



i) Magnitud del espectro armónico de la tensión en la carga por fase.

Figura 4.27. Resultados de simulación trifásica perturbación 8.

Análisis de resultados

- ✓ En cuanto a la compensación de armónicos de tensión en la carga el DVR presenta resultados satisfactorios, teniendo en cuenta que mantiene la distorsión armónica total en cada una de las fases menor al 5% que es el límite permitido para un nivel tensión menor a 69 [kV] según IEEE-519 [82].
- ✓ Observando la gráfica de potencia activa inyectada por el DVR se puede deducir que es cero, esto se debe a que en teoría al no existir corrientes de carga con componentes armónicas la potencia activa inyectada debe ser cero.
- ✓ La reducción en la tensión de la barra de continua puede obedecer a las pérdidas de potencia en el filtro pasivo del DVR.

5. Conclusiones y recomendaciones

En el desarrollo de este proyecto de grado se ha hecho una revisión del *Restaurador Dinámico de Tensión (DVR)* como dispositivo de compensación de algunas de las perturbaciones que afectan la onda de tensión. Esta revisión incluye algunas de las topologías, técnicas de control en el convertidor, cálculo de las señales de referencia y estrategias de compensación para el control de la barra de continua. Además se realizaron simulaciones con el objetivo de verificar y determinar su funcionamiento y opciones de compensación respectivamente.

5.1. Observaciones y conclusiones

Habiendo finalizado con éxito este proyecto, se pueden destacar las siguientes conclusiones y observaciones:

- Se verificó la efectividad del DVR como dispositivo de compensación de algunas perturbaciones de tensión presentes en el sistema de alimentación como: huecos/elevaciones de tensión, componentes armónicas y desequilibrios.
- Los algoritmos utilizados para el cálculo de las señales de referencia en compensación de huecos/elevaciones de tensión deben ser rápidos con el objetivo de reducir el tiempo de respuesta del DVR, por tanto la transformación *DQO* y el filtro de Kalman son una buena opción para lograr este objetivo.
- En sistemas trifásicos para la compensación de armónicos presentes en la tensión de alimentación se puede utilizar el filtro de Kalman para estimar el valor de $wt + \theta$ de la señal distorsionada y posteriormente aplicar la transformación *DQO* para el cálculo de las señales de referencia.
- El filtro de Kalman puede ser usado para la sincronización de las señales de referencia en las estrategias de compensación en pre-falla o en fase como método alternativo al PLL que suele ser el dispositivo más utilizado.
- En el diseño del filtro pasivo en lado del convertidor se deben seleccionar valores de R_f , L_f , y C_f que permitan atenuar las componentes armónicas a los valores requeridos y que a su vez no incrementen significativamente la capacidad nominal de corriente del convertidor ni comprometan el seguimiento de la señal de referencia.
- En el caso del filtro en el lado de la línea, las corrientes armónicas de alto orden que fluyen por el transformador, conllevan a un dimensionamiento mayor de la capacidad de este transformador en comparación con el dimensionamiento para el caso del filtro en el lado del inversor.
- Entre las técnicas de control del convertidor implementadas los resultados obtenidos con Deadbeat fueron los mejores en cuanto a respuesta transitoria y error en el seguimiento de la señal de referencia. Esto se debe a que esta técnica para el cálculo de la señal de

conmutación de los interruptores incluye parámetros del modelo del DVR como: la tensión en la barra de continua, los valores del filtro pasivo (R_f, L_f y C_f) y la corriente de la carga.

- Dependiendo del tipo de perturbación y de la estrategia de compensación utilizada el DVR puede entregar o absorber potencia activa, por tanto en el diseño del DVR se deben considerar estos dos modos de operación para evitar daños principalmente en el dispositivo de almacenamiento de energía.
- La estrategia de compensación en pre-falla representa la mejor opción a utilizar teniendo en cuenta que la tensión en la carga es mantenida en magnitud y ángulo de fase durante la falla. Esto representa una ventaja ya que la mayoría las cargas a proteger no toleran cambios bruscos en el ángulo fase y por tal motivo la utilización de las estrategias de compensación en fase o energía optimizada no es convenientes.
- Finalmente como conclusión personal, el desarrollo de este proyecto de grado nos permitió afianzar y ampliar nuestros conocimientos principalmente en el área de electrónica de potencia, control en el tiempo continuo y control en tiempo discreto. Además se utilizó una herramienta de simulación potente, versátil y de fácil acceso como ATP DRAW.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Al concluir este proyecto, surgen ideas y recomendaciones que pueden ser tenidas en cuenta para el desarrollo de otros proyectos similares.

- En este proyecto de grado se utilizaron tres técnicas de control en el inversor (Deadbeat, Histéresis y PI), sin embargo, se podría implementar una técnica alternativa como el control de modo deslizante, debido a su fuerte utilización y ventajas frente al control convencional presentadas en la literatura actual.
- Con respecto al inversor, se puede estudiar otras topologías como la *TLFB* y la *TLSC* y sus estrategias de control, debido a que en estas topologías será necesario un solo control en el convertidor a diferencia del control por fase utilizado en este proyecto lo cual podría implicar menor capacidad de cálculo.
- Para la unidad de almacenamiento de energía se pueden realizar simulaciones de otras topologías descritas en la sección 2.2.1 con el objeto de realizar un análisis comparativo entre ellas.
- Se puede implementar la estrategia de compensación de energía optimizada ajustando gradualmente el valor de α_{opt} con el fin de evitar saltos bruscos de fase en la tensión de la carga al inicio de la compensación de huecos o elevaciones de tensión.
- Realizar simulaciones incluyendo cargas no lineales para verificar el funcionamiento y las opciones de compensación del DVR bajo estas condiciones.

Referencias

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE STD 1159™.2009
- [2] Villar Cruz Ronald J., Jaimes Flórez Feliz A., *“Caracterización de circuitos de distribución para estudios de calidad en un sistema de energía eléctrica”*, Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [3] Baghini Angelo, *“Handbook of power quality”* Jon Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [4] IEC 61000, *“Electromagnetic Compatibility”*.
- [5] GOST 13109-97 *“Electric power. Electromagnetic Compatibility of Equipment. Standards of power quality in general purpose power supply systems”*.
- [6] ANSI C84.1, 1995, *“American national standard for electric power systems and equipment voltage ratings”*.
- [7] Aridam Ghosh, Gerard Ledwicch, *“Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices”*, Kluwer’s Power Electronics and Power Systems Series, Series Editor: M.A.Pai July 2002.
- [8] Yun Wei Li, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg, D.Mahinda Vilathgamuwa, *“Investigation and Improvement of Transient Response of DVR at Medium Voltage Level”*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, pp 1309 – 1319, 2007.
- [9] Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, *“Structures and Control of a Dynamic Voltage Regulator (DVR)”*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1027-1032, 2001.
- [10] N.H.Woodley, A.Sundaram, B.Coulter and D.Morris, *“Dynamic Voltage Restorer demonstration project experience,”* 12th Conf. Electric Power Supply Industry (CEPSI), Pattaya, Thailand, 1998.
- [11] IEEE P1409 Distribution Custom Power Task Force 2, *Custom Power Technology Development*, 1999.
- [12] John Godsk Nielsen and Frede Blaabjerg, *“A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorer”*, IEEE Transaction on Industry Application, Vol.41, No 5, 2005.
- [13] Yea Zong Kuo, *“Dynamic Voltage Restorer for Sensitive Equipment”*, Presented to the Faculty of Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, May 2007.
- [14] Sasitharan S., Mahesh K.Mishra, B.Kalyan Kumar, and Jayashankar V., *“Rating and Design Issues of DVR Injection Transformer”*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008.

- [15] Chellali Benachaiba and Brahim Ferdi, *"Voltage Quality Improvement Using DVR"*, Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol.XIV, No.2, 2008.
- [16] Wang Jing, Xu Aiqin, Shen Yueyue, *"A Survey on Control Strategies of Dynamic Voltage Restorer"*, Harmonics and Quality of Power, 2008.ICHQP 2008.13th International Conference on, Sept.28 2008-Oct.1 2008 Page(s):1 – 5.
- [17] Gonzales Mario, Cardenas Victor, Moran Luis y Espinosa Jose, *"Selecting Between Linear and Nonlinear Control in Dynamic Voltage Restorer"*, IEEE Power Electronic Specialists Conference, 2008.
- [18] Chellali Benachaiba, Brahim Ferdi. *"Voltage Quality Improvement Using DVR"*, Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. 14, No. 1, 2008
- [19] Paisan Boonchiaml, Promsak Apiratikull and Nadarajah Mithulananthan, *"Detailed Analysis of Load Voltage Compensation for Dynamic Voltage Restorers"*, TENCON 2006, pp. 1-4, 2006.
- [20] Ryszard Strzelecki, Daniel Wojciechowski, Grzegorz Benysek, *"Static Series and Shunt-series PE Voltage-quality Controllers"*, Power Systems, Power Quality, pp 205-230,2007.
- [21] John Godsk Nielsen, Frede Blaabjerg, *"A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers"*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41 pp. 1272-120, 2005.
- [22] Praveen. J, Bishnu P. Muni S.Ventakeshwarl, H.V. Maktbal, *"Review of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement"*, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2004.
- [23] Jonh Hee Han, Jin Geun Shon, Il Dong Seo, Hee Jong Jeon, *"Development of on-Line type Dynamic Voltage Compensation System Using Supercapacitor"*, The 7th International Conference on Power Electronics, October 2007.
- [24] Yan Li, Yun-ling Wang, Bu-han Zhang, Cheng-xiong Mao, *"Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer Based on Super Capacitor Energy Storage"*, International Conference on Electrical Machines and System, 2008.
- [25] Agileswari K.Ramasamy, Vigna Ramachandaramurthy, Rengan Krishna Iyer, *"Dynamic Voltage Restorer Lab Prototype"*, IEEE International Conference on Power and Energy, 2008
- [26] Yan Li, Yun-ling Wang, Bu-han Zhang, Cheng-xiong Mao, *"Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer Based on Super Capacitor Energy Storage"*, International Conference on Electrical Machines and System 2008.
- [27] Illinois Capacitors Inc, *Supercapacitors*, Disponible en internet: <http://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/supercapacitors.pdf>. Consultado: 8 De Septiembre 2010.

- [28] R. Strzelecki, G. Benysek, *“Control Strategies and Comparison of the Dynamic Voltage Restorer”*, Power Quality and Supply Reliability Conference 2008, pp- 79-82, 2008.
- [29] L. Benchaita, S. Saadate, A. Salenmnia, *“A comparison of voltage source and current source active filter by simulation and experimentation”*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no.2 ,pp. 642-647, 1999.
- [30] D. A. Martínez Victoria, *“Balastro Electrónico Mono-etapa”*. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Diciembre 2000.
- [31] Pedro Rodríguez Cortés, *“Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos”*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Enero 2005.
- [32] Krzysztof Piatek, *“Sliding mode control of DVR with minimized energy injection”*, Conference on Power Electronics and Applications, 2005.
- [33] S. S. Choi, B. H. Li, D. M. Vilathgamuwa, *“A Comparative Study of Inverter- And Line-Side Filtering Schemes in the Dynamic Voltage Restorer”*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.4,pp 2967-2972,2000.
- [34] S. S. Choi, B. H. Li and D. M. Vilathgamuwa, *“Design and Analysis of the Inverter-Side Filter Used in the Dynamic Voltage Restorer”*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, pp 857-864, 2002.
- [35] B. H. Li, S. S. C hoi and D.M .Vilathgamuwa, *“Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer”*, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, pp. 1-7, 2001.
- [36] B. H. Li, S. S. Choi, D. M. Vilathgamuwa, *“On the Injection Transformer Used in the Dynamic Voltage Restorer”*, International Conference on Power System Technology, Vol. 2, pp. 941-946, 2000.
- [37] Young-Hoon Cho, Seung-Ki Sul, *“Controller Design for Dynamic Voltage Restorer with Harmonics Compensation Function”*, IEEE Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1452-1457, 2004.
- [38] S. W. Middlekauff, E.R.Collins, *“System and customer impact: consideration of series custom power devices”*, IEEE Trans.on Power Delivery, vol.13, No.1, pp.278-282, Enero 1998.
- [39] Nielsen J.G., Blaabjerg F., Mohan N., *“Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump”*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, pp 1267-1273, 2001.

- [40] Quirl, B.J.; Johnson, B.K.; Hess, H.L., *“Mitigation of Voltage Sags with Phase Jump Using a Dynamic Voltage Restorer”*, 38th North American Power Symposium, pp 647-654, 2006.
- [41] Meyer, C.; De Doncker, R.W.; Yun Wei Li; Blaabjerg, F. *“Optimized Control Strategy for a Medium-Voltage DVR—Theoretical Investigations and Experimental Results”*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, pp 2746-2754, 2008.
- [42] Il-Yop Chung, Dong-Jun Won, Sang-Young Park, Seung-Il Moon, Jong-Keun Park, *“The DC link energy control method in dynamic voltage restorer system”*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, pp. 525-531.,2003.
- [43] Etxeberria Otadui I., Viscarret U. Bacha S., Caballero M., Reyero, R. *“Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation”*, Power Electronics Specialists Conference, Vol. 4, pp 1797-1802.
- [44] Meyer C., Romaus C., De Doncker R.W., *“Optimized Control Strategy for a Medium-Voltage DVR”*, Power Electronics Specialists Conference, pp. 1 - 7, 2006.
- [45] Brice J. Quirl, Brian K. Johnson, Herb L. Hess, *“Mitigation of Voltage Sags with Phase Jump Using a Dynamic Voltage Restorer”*, 38th North American Power Symposium, pp. 647-654, 2006.
- [46] Mehmet Tümay, Ahmet Teke, K. Çağatay Bayındır, M. Uğraş Cuma., *“Simulation and Modeling of a Dynamic Voltage Restorer”*. Disponible en internet: http://www.emo.org.tr/ekler/ee5605917626676_ek.pdf. Consultado: 28 Octubre 2010.
- [47] A. Moreno Mufioz, D. Oterino, M González, F. A. Olivencia, J. J. González-de-la-Rosa. *“Analysis of sag compensation with dynamic voltage restorer”*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol.3, pp. 1637-1641.
- [48] S. S. Choi, B. H. Li, and D. M. Vilathgamuwa, *“Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection”*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, 2000.
- [49] Vilathgamuwa, D.M., Perera, A.A.D.R., Choi, S.S. *“Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer”*, Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, pp 928-936, 2003.
- [50] Víctor M. Moreno, Alberto Pigazo, Marco Liserre y Antonio Dell’Aquila *“Control of Dynamic Voltage Restorers Using a Fully-Configurable Digital Estimation Technique”*, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE), 2005.
- [51] H. Amarís, C. Álvarez, M. Alonso, D. Florez, T. Lobos, P. Janik, J. Rezmer y Z. Waclawek, *“Computation of Voltage Sag Initiation with Fourier based Algorithm, Kalman Filter and Wavelets”*, IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th a Jule 2nd 2009, Romania .

- [52] Y. H. Cho and S. K. Sul, "Controller Design for Dynamic Voltage Restorer with Harmonics Compensation Function", IEEE Industry Applications Conference , Vol. 3, pp 1452-1457, 2004.
- [53] Mahinda Vilathgamuwa, A.A.D. Ranjith Perera and S.S. Choi, "Storage Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer". Disponible en internet: <http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec99/vilathgamuwa99.pdf>. Consultado: 21 de Septiembre de 2010.
- [54] H.Ezoji, A.Sheikholeslami, M.Tabasi, M.M.Saeednia, "Simulation of Dynamic Voltage Restorer Using Hysteresis Voltage Control", European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.27 No.1, pp.152-166, 2009.
- [55] S. Haykin, "Adaptive filter theory", 4ta ed., P. Hall, Ed., 2002.
- [56] J. Petit. "Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia y sistemas desequilibrados", Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Lérganes 2007.
- [57] V. Moreno and J. Barros, "Application of Kalman filtering for Continuous Real Time Tracking of Power System Harmonics", IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 144, No. 1, pp 13-20, 1997.
- [58] Adly A. Girgis, W. Bin Chang, Elham B. Makram, "A Digital Recursive Measurement Scheme For On-Line Tracking Of Power System Harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery ,Vol. 6, No. 3, July 1991.
- [59] Salvador Alepuz Meléndez, "Aportación al control del convertido CC/CA de tres niveles", Tesis doctoral, Universidad Politécnica Cataluña, Noviembre 2004.
- [60] Pietzsch García, Mónica, "Convertidores CC/CA para la conexión directa a red de sistemas fotovoltaicos: comparación entre topologías de 2 y 3 niveles". Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Diciembre de 2004.
- [61] Francisco F. Obando, Carlos G. López, "Filtro para extracción de componentes d-q-0 mediante series de Fourier.". Disponible en internet: http://ai.unicauca.edu.co/publicaciones/Franco_ACA09.pdf. Citado el 13 de Octubre de 2010. }
- [62] Wang Jing, Xu Aiqin, Shen Yueyue, "A Survey on Control Strategies of Dynamic Voltage Restorer", 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp 1 – 5, 2008.
- [63] G. Vargas Cáceres, J. Gelvez Lizarazo. "Filtros Activos de Potencia: Análisis Comparativo entre Técnicas de Control Utilizadas en el Convertidor de Potencia", Trabajo de grado para Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [64] Fawzi AL Jowder, "Modeling and Simulation of Different System Topologies for Dynamic Voltage Restorer using Simulink", International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, pp.1-6, 2009.

- [65] K.Chandrasekaran, P.A.Venkatachalam, Mohd Noh Karsiti, *“Dynamic Voltage Restorer as a Sag Mitigator and Harmonic Restorer”*, IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp. 904-909, 2008.
- [66] H.Ezoji, A.Sheikholeslami, M.Tabasi, M.M.Saeednia, *“Simulation of Dynamic Voltage Restorer Using Hysteresis Voltage Control”*, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.27 No.1, pp.152-166, 2009.
- [67] Jowder, F.A.L., *“Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer (DVR) Based on Hysteresis Voltage Control”*, Industrial Electronics Society, pp. 1726 – 1731, 2007.
- [68] Krzysztof Piatek, *“Sliding mode control of DVR with minimized energy injection”*, Conference on Power Electronics and Applications, 2005.
- [69] G.V. Nagesh Kumar, D. Deepak Chowdary, *“DVR with Sliding Mode Control to alleviate Voltage Sags on a Distribution System for Three Phase Short Circuit Fault”*, 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third International Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur,INDIA December 8 -10, 2008.
- [70] Rammohan Rao Errabelli, Y.Y. Kolhatkar, and S.P. Das, *“Experimental Investigation of DVR with Sliding Mode Control”*, Power India Conference, 2006.
- [71] Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, *“Structures and Control of a Dynamic Voltage Regulator (DVR)”*, Power Engineering Society Winter Meeting IEEE, Vol. 3 pp. 1027-1032,2001.
- [72] Arindam Ghosh, Amit Kumar Jindal, and Avinash Joshi, *“Design of a Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Distorted Loads”*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, 2004.
- [73] F. Jurado, *“Neural network control for dynamic voltage restorer”*, IEEE Trans on Industrial Electronics , Vol. 51, No 3, pp 727-729, 2004.
- [74] Lei Yan, *“Research on dynamic voltage restorer with intelligent control”*, Master of Engineering dissertation, Xi’an University of Science and Technology, Xi’an, China, 2007.
- [75] Rosli Omar and N.A Rahim, *“Implementation and Control of a Dynamic Voltage Restorer Using Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) for Voltage Sag Mitigation”*, International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), pp. 1-6, 2009.
- [76] Changjiang Zhan, A.Arulampalam, V.K. Ramachandaramurthy, C. Fitzer, M. Barnes, N. Jenkins, *“Dynamic Voltage Restorer Based on 3-Dimensional Voltage Space Vector PWM Algorithm”*, Power Electronics Specialists Conference, pp. 533-538, 2001.
- [77] Ali Emadi, Alireza Khaligh, Zhong Nie, Young Joo Lee., *“Integrated Power Electronic Converters and Digital Control”*, CRC Press, pp. 225–272,2009.

[78] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall 1983.

[79] Kawamura A., Haneyoshi T., Hoft R.G., *“Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor”*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 3 pp. 118-125, 1988.

[80] Saavedra P. Gustavo A., Sandoval D. Alexander, *“Análisis y diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica en el Centro de Tecnologías de Información y Comunicación “CENTIC” de la Universidad Industrial de Santander”*, Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander, 2009.

[81] Zhongdong Yin, Minxiao Han, Lixia Zhou, Kunshan Yu, *“Project study of dynamic voltage restorer”*, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp. 1-8, 2005.

[82] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-1992.

Anexos

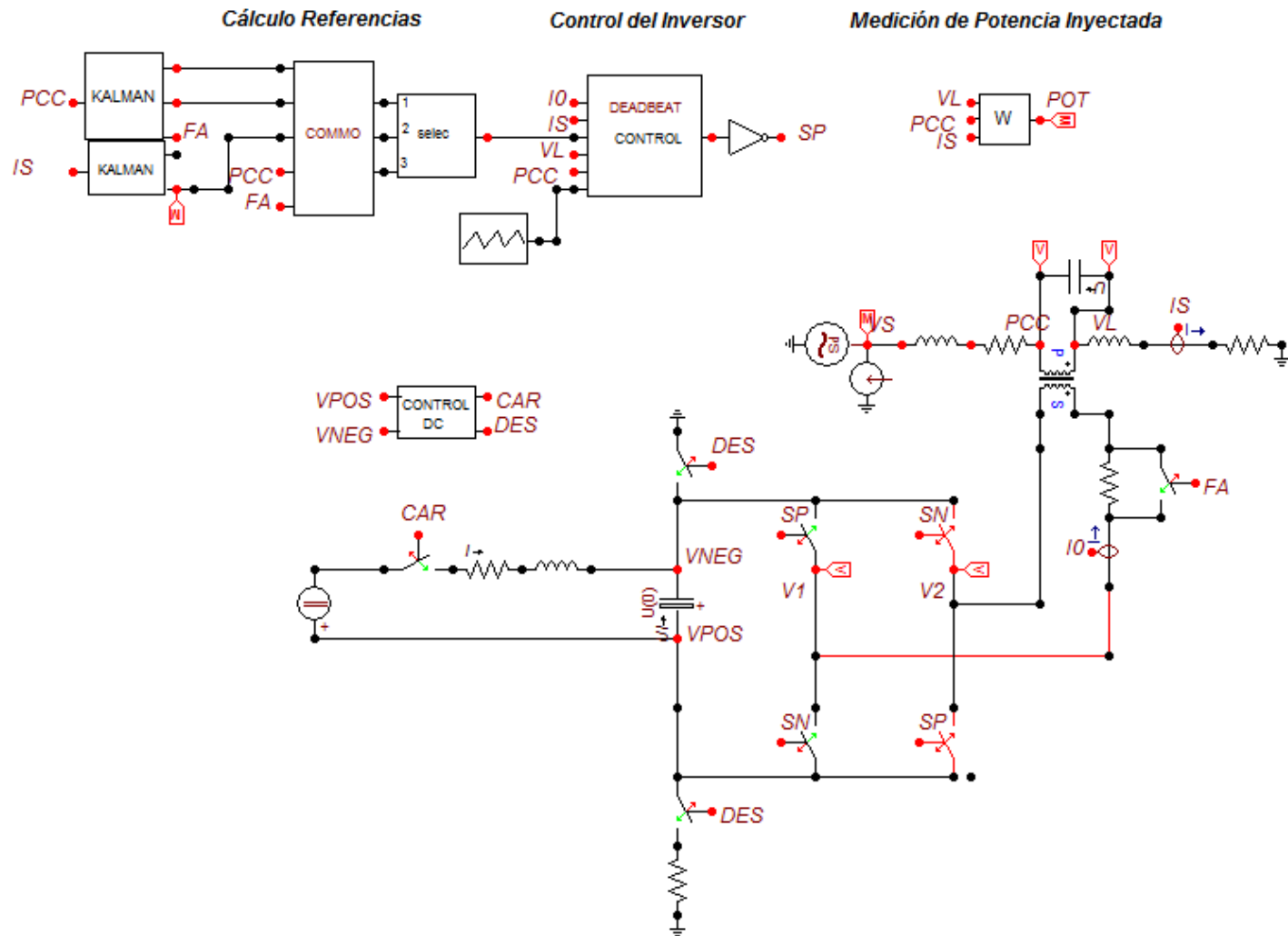
Anexo A. Circuitos de simulación.

En este anexo se presenta los circuitos de simulación implementados en ATP DRAW para el desarrollo del proyecto los cuales son:

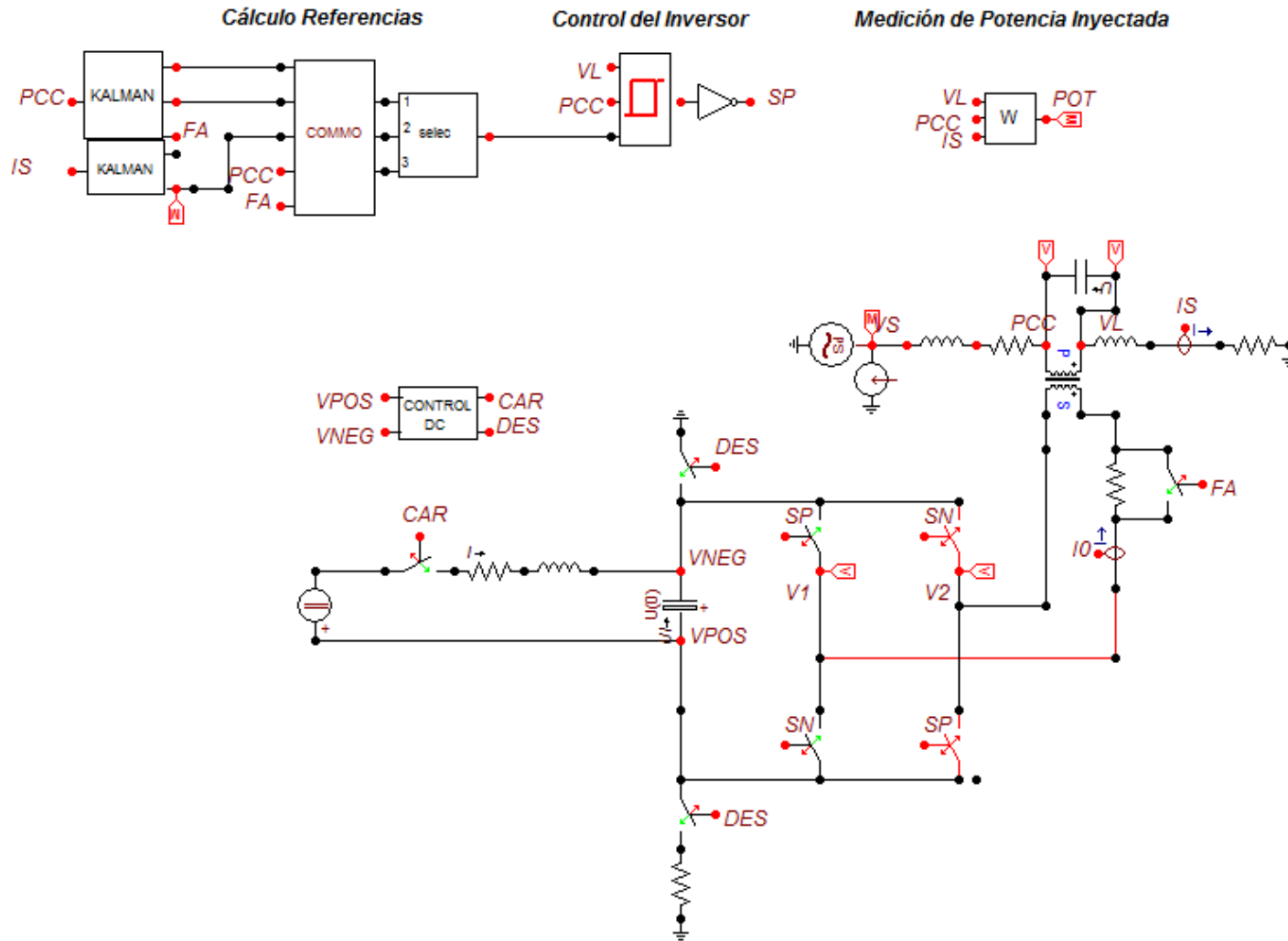
1. Circuito de simulación DVR monofásico, control del convertidor por Deadbeat, filtro capacitivo al lado de la red, estrategia de compensación pre-falla, en fase y con energía optimizada.
2. Circuito de simulación DVR monofásico, control del convertidor por Histéresis, filtro capacitivo al lado de la red, estrategia de compensación pre-falla, en fase y con energía optimizada.
3. Circuito de simulación DVR monofásico, control del convertidor PI, filtro capacitivo al lado de la red, estrategia de compensación pre-falla, en fase y con energía optimizada.
4. Circuito de simulación DVR trifásico, control del convertidor por Deadbeat uno por cada fase, filtro RLC en el lado del convertidor, estrategia de compensación pre-falla, en fase y con energía optimizada.

Los circuitos se muestran a continuación en el orden anteriormente establecido.

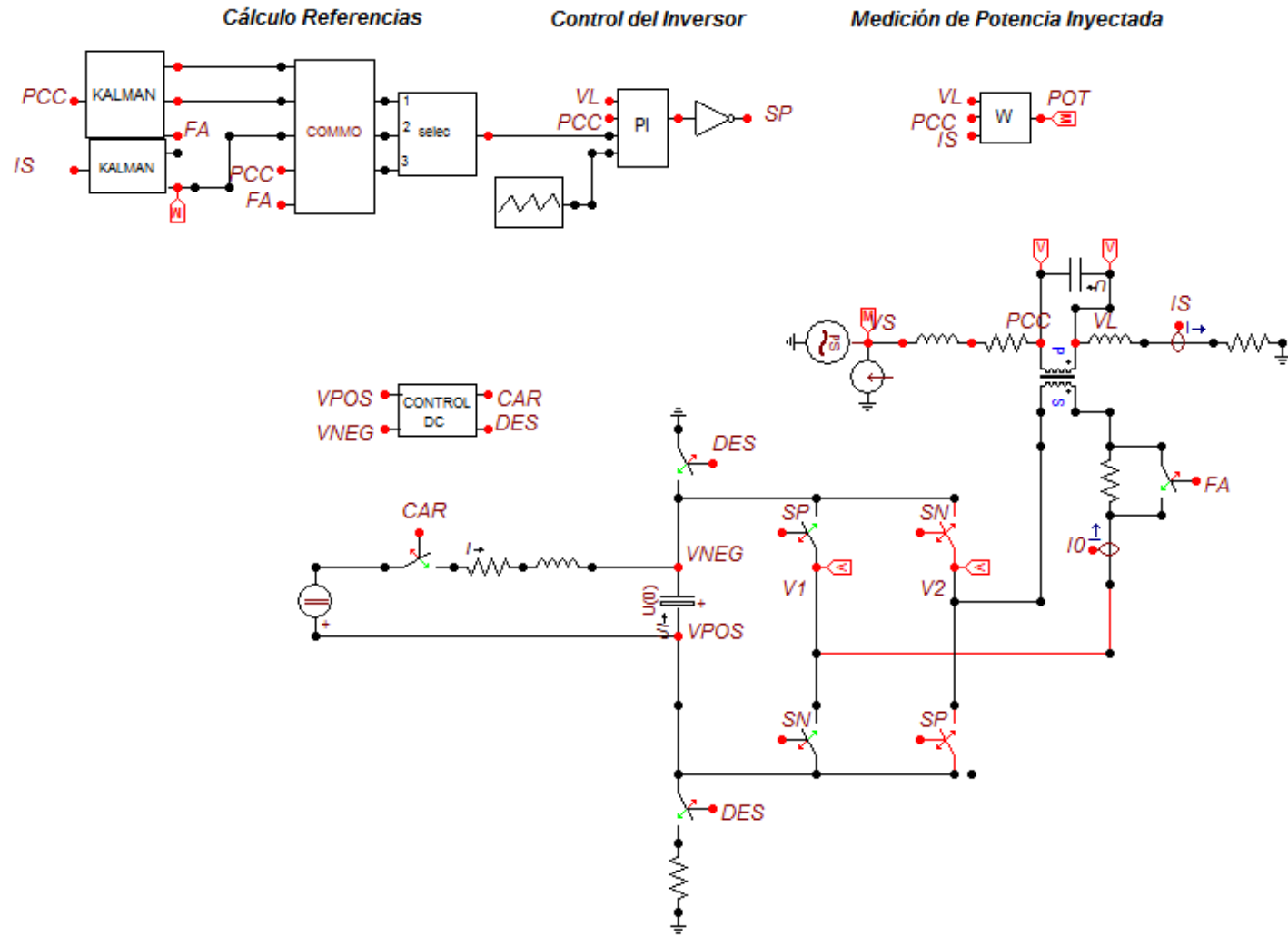
Circuito de simulación monofásico en ATP DRAW del DVR con control en el convertidor por deadbeat.



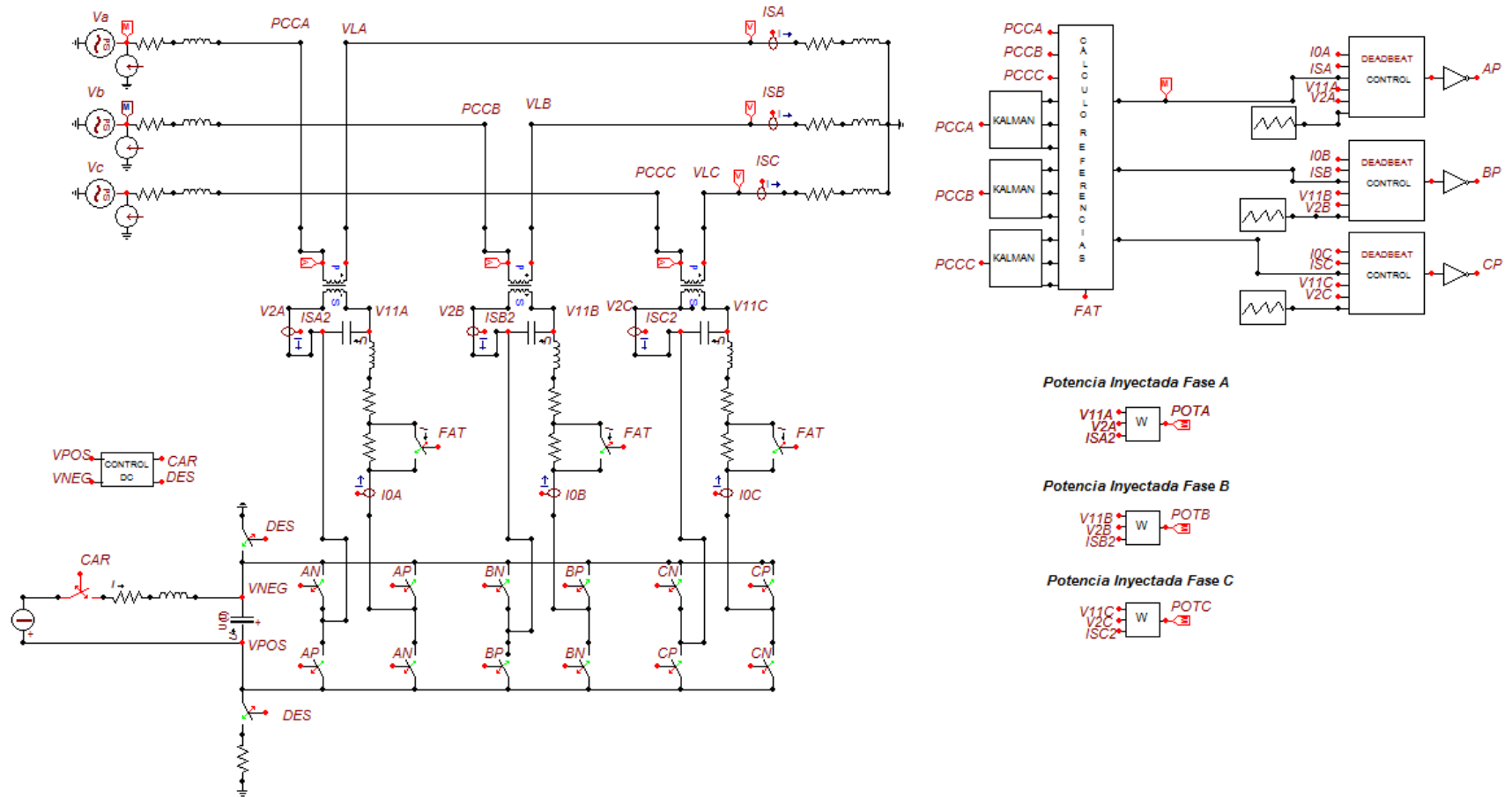
Circuito de simulación monofásico en ATP DRAW del DVR con control en el convertidor por histéresis.



Circuito de simulación monofásico en ATP DRAW del DVR con control en el convertidor PI.



Circuito de simulación trifásico en ATP DRAW del DVR.



CONSTRUCCIÓN MODELS EN ATP-DRAW⁶

La subrutina *Models* de ATP se caracteriza por ser un lenguaje de programación de descripción técnica en donde se utilizan un grupo de instrucciones sencillas que permiten la representación y estudio de sistemas variables en el tiempo, el modelamiento de sistemas físicos complejos y sistemas de control de forma estructurada, con lo cual se logran descomponer tareas complejas en forma modular.

Los módulos de *Models* pueden recibir como entradas señales del circuito eléctrico de potencia (tensiones, corrientes, estado de interruptores, etc.) o señales asumidas externamente por el usuario (ecuaciones, funciones especiales, listados de puntos, etc.) y entregan señales a elementos tipo **TACS** o directamente al circuito como un equivalente de Thevenin o Norton. El módulo básico de la subrutina se denomina "**model**".

Al usar *Models* se pueden crear aplicaciones como:

- Construcción de fuentes de tensión o corriente, con características específicas, basadas en ecuaciones o en requerimientos particulares del usuario.
- Resistencias no lineales, que pueden ser variables de acuerdo al tiempo, la tensión o la corriente, obtenidas a partir de una tabulación de puntos o alguna ecuación particular.
- Control de interruptores, a partir de tensión, corriente, tiempo, etc.
- Medidores de parámetros eléctricos como potencia, energía, factor de potencia, valor RMS etc., en cualquier punto del circuito.

A.1. Implementación de MODELS en ATPDRAW

El módulo básico *model* puede incorporarse como un nuevo elemento de la librería MODELS de ATPDRAW, de tal forma que aparezca en forma de icono cada vez que se requiera para ser usado en un caso de simulación. Para la creación del *model* se requieren dos archivos con las siguientes extensiones⁷:

- ✓ *.MOD (*model* editado)
- ✓ *.SUP (archivo de soporte)

Estos archivos se crean directamente en ATPDRAW en el menú *objects* o *Library* según corresponda la versión.

Para explicar de una mejor forma la creación de un *model*, a continuación se presenta un ejemplo desarrollado en este proyecto de grado.

A.1.1 Fuente de tensión con perturbaciones en Model

⁶ Este anexo se realiza basado en las instrucciones y procedimientos descritos en el libro **Modelamiento de protecciones utilizando ATP** desarrollado por el Grupo de Investigación en compatibilidad electromagnética (EMC-UN) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

⁷ Para una versión 3.5 o superior de ATPDRAW

La fuente de tensión que se desea crear debe tener los siguientes datos de entrada:

Datos entrada		
Parámetro	Nombre ATPDRAW	Unidad
Amplitud	Ampl	Volts
Frecuencia	Frec	Hz
Variación de magnitud	Varmag	p.u.
Variación de fase	Varfase	Grados
Variación de frecuencia	Varfrec	p.u.
Tiempo inicio perturbación	t1	s
Tiempo fin perturbación	t2	s

Tabla A.1. Datos de entrada model fuente con perturbaciones

Esta fuente de tensión debe permitir simular huecos/elevaciones de tensión, variaciones de fase y de frecuencia. Éste ejemplo de desarrolla en ATPDRAW versión 5.5.

A.1.1.1 Archivo *.MOD

Este archivo puede ser creado en cualquier editor de texto externo a ATPDRAW (DOS, NOTEPAD, WORDPAD, WORD, etc.) o mediante la opción *Library-New Object-Model Mod- File* dentro de ATPDRAW (ver Figura A.1) y debe ser guardado en la carpeta que se encuentra en el directorio ATP/Project/mod.

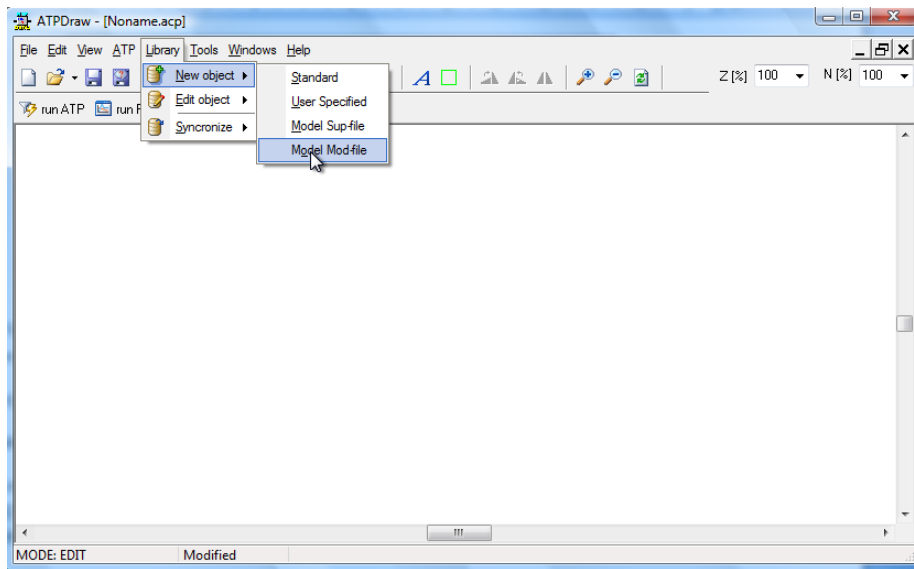


Figura A.1. Menú *Library* utilizado para crear *Models* en ATPDRAW

El formato general de descripción para un *model* en el archivo *.MOD se presenta a continuación:

MODEL default--- *Nombre del modelo*

INPUT -- *Nombre de las variables de entrada. Los nombres de las variables deben ser separados por una coma o por CR.*
 OUTPUT -- *Nombre de las variables de salida, separadas igualmente que las entradas.*
 DATA -- *Nombre de las variables de tipo dato.*
 VAR -- *Nombre de las variables locales, incluyendo las variables de salida.*
 CONST—*Nombre y valores de constantes*
 INIT-- *Inicialización de variables*
 ENDINIT
 EXEC – *Ejecución del Model*
 ENDEXEC
 ENDMODEL

Las palabras **MODEL** Y **ENDMODEL** del formato corresponden al inicio y al final de algún modelo en particular incorporado a la simulación y debe contener las instrucciones en lenguaje **MODELS** (INPUT, OUTPUT, VAR, DATA, etc.) que lo describen.

La descripción de un modelo se realiza mediante diferentes tipos de asignaciones y ciclos repetitivos clasificados en declaraciones, directrices de simulación y procedimientos. A continuación se describen algunas de estas clasificaciones que fueron utilizadas en el proyecto.

Declaraciones

DATA: Declaración específica de elementos visibles (datos) dentro del *model*, donde son declarados y no varían durante la simulación. En la fuente el valor de cada uno de los datos se asignó por defecto de la siguiente forma:

```

DATA   Ampl {dflt: 120}
        Frec {dflt:60}
        Fase {dflt: 0}
        Varmag {dflt: 0}
        Varfase {dflt: 0}
        Varfrec {dflt: 0}
        t1 {dflt:-1}
        t2 {dflt:-1}
  
```

INPUT: Son elementos de entrada variables durante la simulación. La fuente que se desea crear no tiene entradas. En caso de que un *model* tenga entradas se pueden declarar de la siguiente forma:

```
INPUT nombre-entrada1, nombre-entrada2, nombre-entrada3, etc.
```

También se pueden escribir en forma de columna:

```

INPUT nombre-entrada1
      nombre-entrada2
      nombre-entrada3
  
```

OUTPUT: Corresponde a las variables de salida declaradas dentro del *model*. Estas no pueden asumir valores por defecto. La forma de declarar las variables de salida es similar a la utilizada con las entradas, en el caso de la fuente de tensión:

OUTPUT VSAL

VAR: Corresponde a la declaración de aquellos elementos que varían dentro del model. El valor de estos elementos puede ser utilizado en alguna expresión de los procedimientos del model y también como elemento de salida (OUTPUT). Se declaran en fila y separados por coma o en columna. En el caso de la fuente de tensión las se declaran de la siguiente forma:

VAR M, VSAL, cam

Procedimientos

Los principales procedimientos usados en MODELS son:

EXEC: Es el procedimiento más importante realizado en un *model*, contiene la descripción del algoritmo operacional que se desarrollará durante el tiempo de simulación y es ejecutado para cada paso de tiempo. Este procedimiento se inicia y termina con las palabras **EXEC** y **ENDEXEC**, respectivamente dentro de las cuales estará descrito el algoritmo de simulación, constituido por ciclos de instrucciones del tipo **IF THEN, ELSE, DO, REDO, FOR DO, WRITE, WHILE**, etc., y por un grupo de funciones residentes propias del programa.

La estructura para algunas de las instrucciones nombradas anteriormente se muestra a continuación:

```
IF condition_is_true THEN  
    statement list  
ELSIF another_condition_is_true THEN  
    another statement list  
ELSIF ...  
...  
ENDIF
```

```
WHILE condition_is_true DO  
    statement list  
ENDWHILE
```

```
FOR i:= list of values  
FOR j:= list of values  
FOR ...  
DO  
    statement list
```

ENDFOR

Otro procedimiento que es ampliamente utilizado en Models es **INIT** el cual se describe continuación:

INIT: Este procedimiento describe la inicialización del algoritmo del *model*, independientemente de las aplicaciones del mismo. El procedimiento de inicialización se especifica con las sentencias **INIT** y **ENDINIT**. A continuación se muestra el ejemplo de inicialización de la fuente de tensión:

```
INIT
VSAL:=0
ENDINIT
```

Es importante tener en cuenta las expresiones regulares que trabaja el lenguaje MODELS, las cuales se muestran a continuación:

Operadores de relación:

- > Mayor que
- >= Mayor igual que
- < Menor que
- <= Menor igual que
- = Igual a
- <> Diferente de

Operadores numéricos:

- + Suma
- Sustracción
- * Multiplicación
- / División
- ** Potencia

MOD modulo

Operadores Lógicos

- OR
- AND

:= Asignación

Además *Models* contiene funciones matemáticas como seno, coseno, logaritmo natural, entre otras. Estas pueden ser consultadas en la ayuda de ATPDRAW.

Finalmente el código de programación de la fuente queda de la siguiente forma:

```
MODEL ften
```

OUTPUT VSAL

```
DATA  Ampl {dflt: 120}
      Frec {dflt: 60}
      Fase {dflt: 0}
      Varmag {dflt: 0}
      Varfase {dflt: 0}
      Varfrec {dflt: 0}
      t1 {dflt:-1}
      t2 {dflt:-1}
```

VAR M, VSAL, cam

init

VSAL:=0

endinit

EXEC

if Varmag<>0 then

 M:= 1+Varmag

 cam:= Ampl*M*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)

endif

if Varfase<>0 then

 cam:= Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Varfase*pi/180+Fase*pi/180)

endif

if Varfrec<>0 then

 cam:=Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180)

endif

if Varfase<>0 and Varfrec<>0 then

 cam:=Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180+Varfase*pi/180)

endif

if Varmag<>0 and Varfrec<>0 then

 cam:=M*Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180)

endif

if Varmag<>0 and Varfase<>0 then

 cam:=M*Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Varfase*pi/180+Fase*pi/180)

endif

if Varmag<>0 and Varfrec<>0 and Varfase<>0 then

 cam:=M*Ampl*cos ((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180+Varfase*pi/180)

endif

if Varmag<>0 or Varfase<>0 or Varfrec<>0 then

 if t1=0 then

 Vsal:=cam

 if t>t2 then

```

Vsal:= Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif
else
if t<=t1 then

    VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
ENDIF
if t>=t1 then
    if t<t2 then
        VSAL := cam
    endif
endif
if t>t2 then
    VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif
endif
else
VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

El archivo se guarda con el nombre de **ften.mod**.

A.1.1.2 Archivo *.SUP

Este archivo se crea mediante la opción *Library-New Object-Model Sup-file* (ver Figura A.2) y debe guardarse en la misma carpeta de archivo *. MOD.

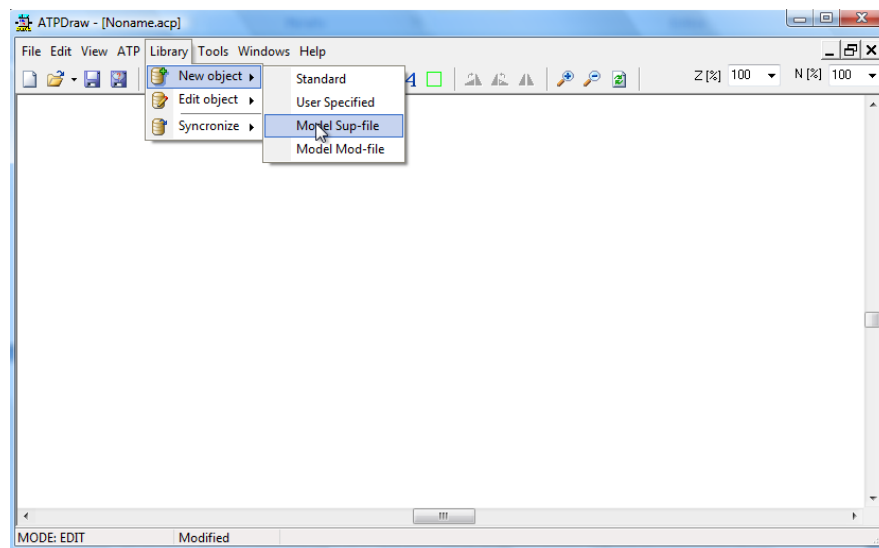


Figura A.2. Opción *Library-New Object-Model Sup-file* para la creación archivo de soporte (.Sup)

La ventana que se muestra en ATP-DRAW al seleccionar la opción Model-Sup-file se muestra en la Figura A.3.

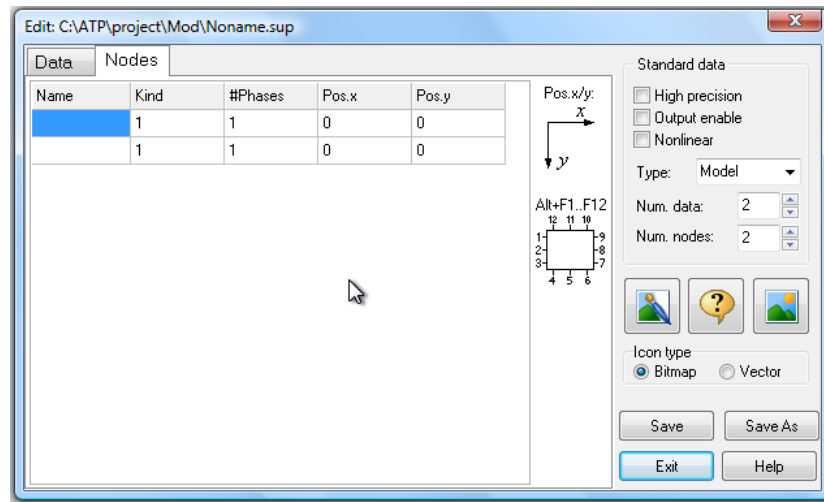


Figura A.3. Ventana edición archivo de soporte

A continuación se hace una explicación del significado de cada uno de los campos mostrados en la ventana del archivo *.SUP y como se especifica cada uno de ellos de acuerdo al ejemplo de la fuente de tensión.

A.1.1.2.1 Especificación del tamaño del model

El tamaño del model se define a partir de las siguientes especificaciones:

Número de datos (Num. Data): Es la cantidad de variables declaradas en la sección DATA cuando se define el model. En el caso de la fuente de tensión se tienen 8 variables tipo dato en total.

Número de nodos de entrada/salida (Num. nodes): Es la suma del número de entradas y salidas definidas en las secciones INPUT y OUTPUT del *model* y corresponden a los nodos del circuito en los cuales se toman y entregan las distintas señales/valores. En el caso de la fuente solo tiene un nodo de salida (Vsal).

A.1.1.2.2 Definición de los datos de entrada

Habiendo definido el número de datos se deben llenar las casillas correspondientes a los datos. Una breve descripción de cada uno de estas casillas se muestra a continuación:

- Nombre (Name):** Nombre del dato.
- Valor por defecto (Default):** Valor por defecto del dato.
- Unidades (Units):** Unidades del dato.
- Min:** Valor mínimo del dato
- Max:** Valor máximo del dato.

Dígitos (Digits): Número máximo de dígitos permitidos en el valor del dato.

En caso que no se desee tener un límite mínimo ni máximo en el dato, los campos Min y Max se deben llenar con un mismo valor.

Los datos de la fuente de tensión se muestran en la Figura A.4.

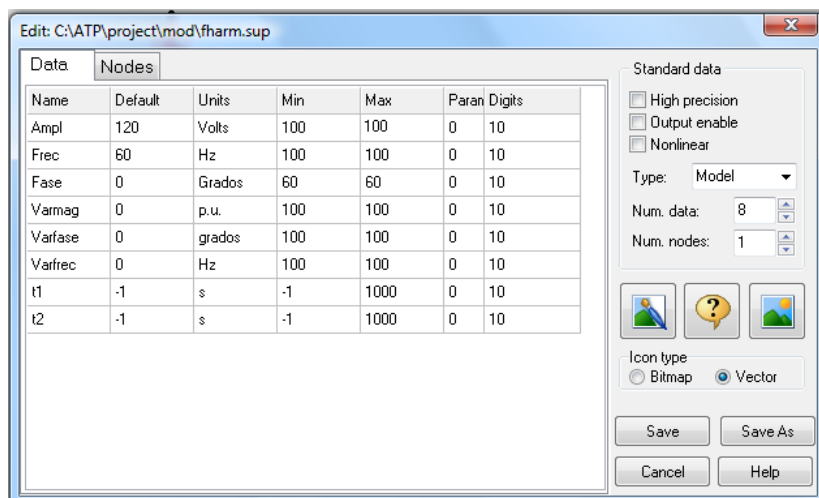


Figura A.4. Ventana de ingreso datos *model* fuente de tensión con perturbaciones

A.1.1.2.3 Especificación del tipo de nodos

Para cada nodo del archivo de soporte se debe indicar el nombre (*Name*), tipo (*Kind*), posición que ocupa dentro de los bordes del ícono (12 posiciones posibles) y el número de fases.

El tipo de nodo se establece de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

- 0: Nodo de salida.
- 1: Entrada de corriente.
- 2: Entrada de tensión.
- 3: Entrada de señal de estado de un interruptor.
- 4: Entrada de variable de máquina eléctrica.
- 5: Entrada variable tipo TACS.
- 6: Parte imaginaria de un nodo de tensión complejo en estado estable.
- 7: Parte imaginaria de una corriente compleja en estado estable de un interruptor.
- 8: Salida de otro modelo.
- 9: Entrada variable global de ATP.

Los nodos correspondientes para la fuente de tensión son mostrados en la Figura A.5.

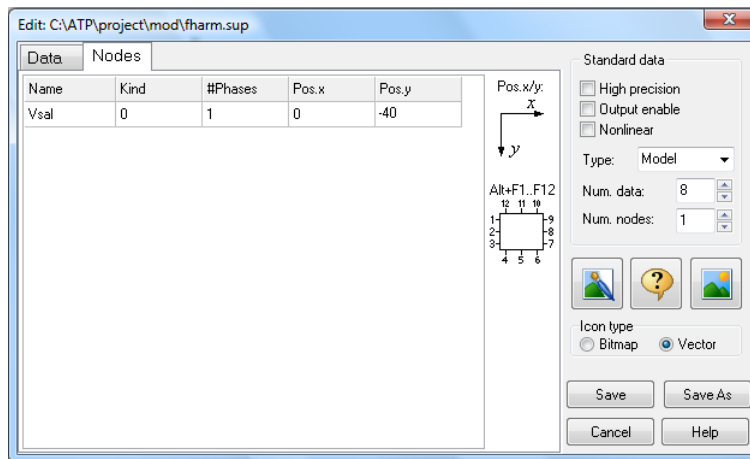


Figura A.5. Ventana identificación de los nodos *model* fuente de tensión con perturbaciones

A.1.1.2.4 Icono Model

ATPDRAW permite crear el icono de dos formas (Icon type), como mapa de bits (Bitmap) o como tipo vector (Vector). Los autores del proyecto recomiendan el tipo vector debido a que representa mayor facilidad y versatilidad.

Para acceder al editor del Icono se debe hacer clic en el recuadro rojo que se muestra en la Figura A.6.

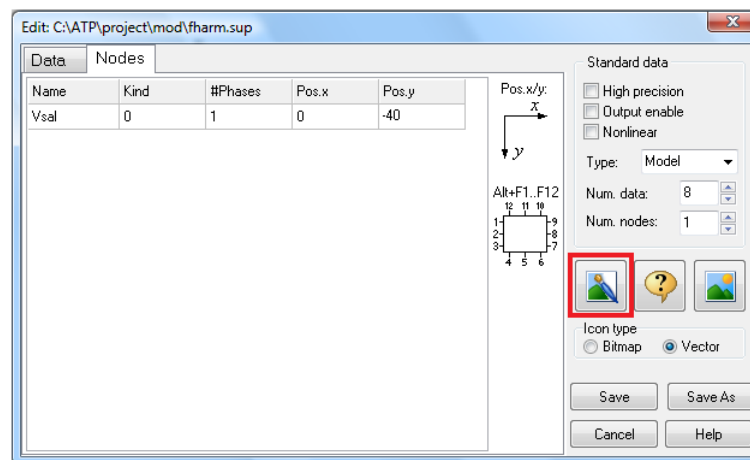


Figura A.6. Selección opción para edición del icono del model

Estando en el editor de texto aparece la ventana que se muestra en la Figura A.7, donde se puede crear la forma y el texto que se desea tenga el Icono.

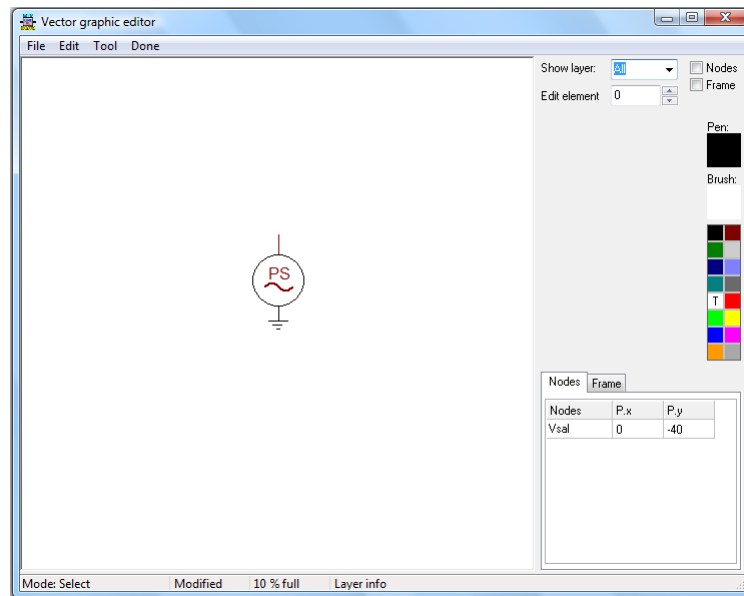


Figura A.7. Ventana edición icono del *model*.

Finalmente se guarda el archivo *.SUP con el mismo nombre del archivo *.MOD., por tanto el archivo queda con el nombre **ften.sup**.

A.2. Model en un caso de simulación

Habiendo creado los dos archivos del *model*, este se puede agregar a un caso de simulación cualquiera donde se requiera utilizar. Para esto se presiona el clic derecho del mouse sobre la hoja de trabajo en ATPDRAW, para acceder a la opción MODELS-Files (sup/mod) como se muestra en la Figura A.8, estando allí se busca y se selecciona el nombre del archivo con extensión .MOD o .SUP y se agrega al caso de simulación.

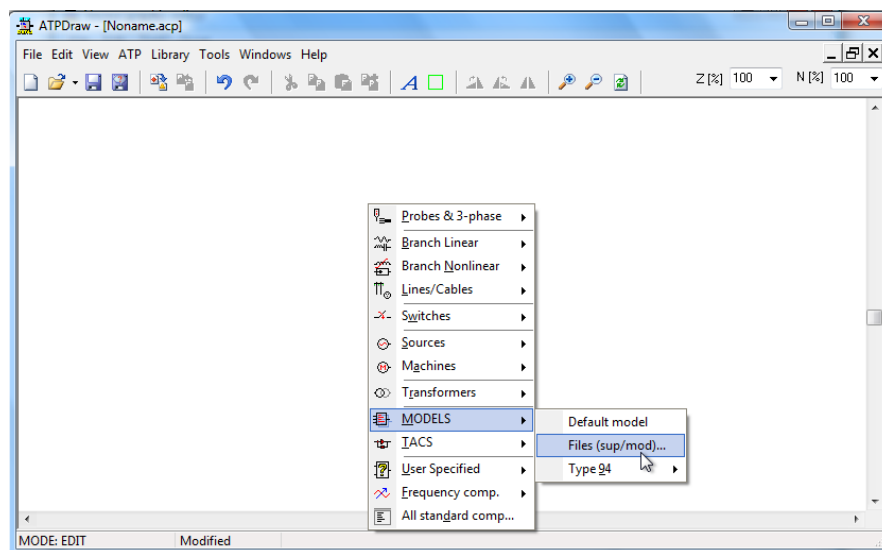


Figura A.8. Incorporación model en un caso de simulación de ATPDRAW

En el caso de la fuente de tensión se debe utilizar la fuente TACS para acoplar el modelo al circuito de potencia de ATP, esta se agrega al circuito de simulación de forma similar al *model* tal y como se muestra en la figura A.9.

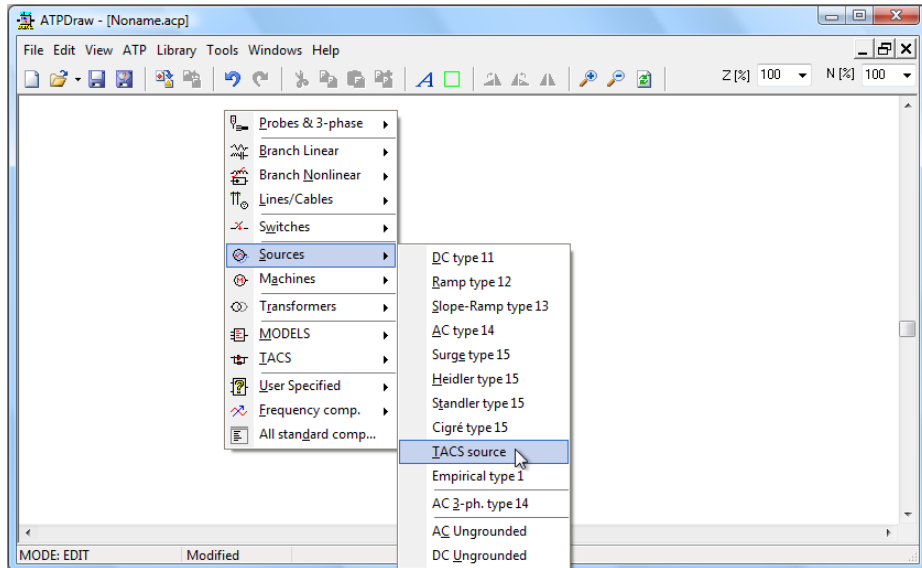


Figura A.9. Incorporación fuente TACS (*TACS SOURCE*) en un caso de simulación de ATPDRAW

Finalmente al utilizar la fuente de *model* y la fuente TACS se puede crear un circuito de simulación sencillo como el que se muestra en la Figura A.10.

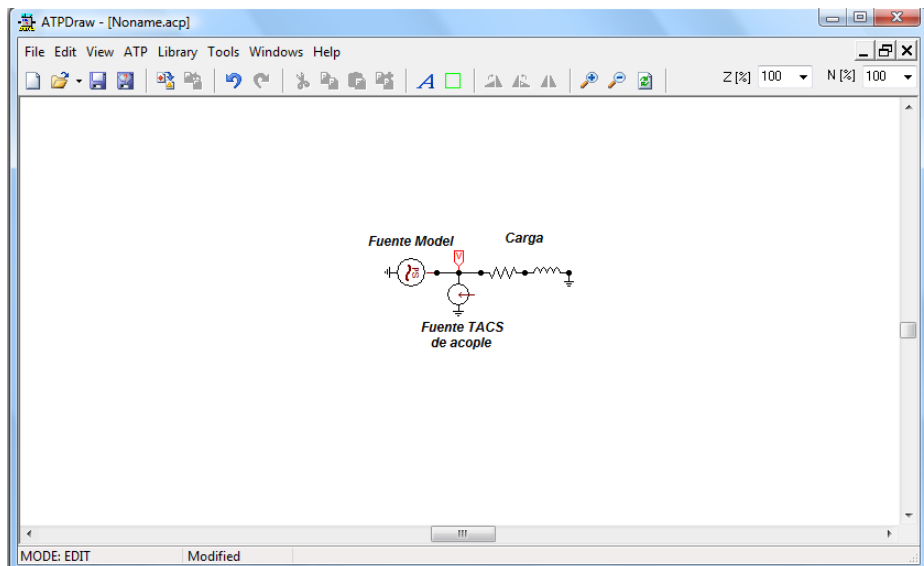


Figura A.10. Circuito de simulación con el *model* fuente de tensión con perturbaciones

A.3. Model creados en el proyecto

En este proyecto a parte de la fuente de tensión se crearon otros modelos. Estos son:
Control Predictivo Deadbeat

Control PI
Control Histéresis
Señal portadora triangular
Cálculo señales de referencia sistema monofásico
Cálculo señales de referencia sistema trifásico
Control tensión barra de continua
Filtro lineal de Kalman estimación componente fundamental
Filtro lineal de Kalman, estimación componente fundamental y armónico de orden quinto y séptimo
Negador
Medidor potencia activa
Selector

Estos modelos se crearon siguiendo los mismos pasos descritos para el caso de la fuente de tensión. El código de programación de cada uno de estos se muestra a continuación:

Control predictivo Deadbeat

MODEL deadfio

INPUT IO,IS,VREF,V1,V2,Portad

OUTPUT OUT1

DATA Cf {dflt:100}

Lt {dflt:10}

R {dflt:10}

Vdc {dflt:400}

h {dflt:0.05}

r1 {dflt:1}

r2 {dflt:1}

Ts {dflt:1e-6}

VAR OUT1,a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,f11,f12,f21,f22,g11,g12,g21,g22,s1,vrefp,vrefk,
p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,p8,td,isp,up,vfp,uk,pil

init

p1:=0

p2:=0

p3:=0

p4:=0

p5:=0

p7:=0
 p8:=0
 k:=0
 isp:=0
 up:=0
 vfp:=0
 pil:=0
 endinit
 EXEC

a1:=0
 a2:=1/Cf
 a3:=-1/Lt
 a4:=-R/Lt
 b1:=0
 b2:=-1/Cf
 b3:=Vdc/Lt
 b4:=0

td:=Ts

if t=k*Ts then
 k:=k+1

$p1:=((a1*(a1*(a1**2 + a2*a3) + a2*(a1*a3 + a3*a4)))/24 + (a2*(a3*(a1**2 + a2*a3) + a4*(a1*a3 + a3*a4)))/24)*td**4$

$p2:=((a1*(a1**2 + a2*a3))/6 + (a2*(a1*a3 + a3*a4))/6)*td**3 + (a1**2/2 + (a2*a3)/2)*td**2 + a1*td + 1$

f11:=p1+p2

$p3:=((a1*(a2*(a4**2 + a2*a3) + a1*(a1*a2 + a2*a4)))/24 + (a2*(a4*(a4**2 + a2*a3) + a3*(a1*a2 + a2*a4)))/24)*td**4$

$p4:=((a2*(a4**2 + a2*a3))/6 + (a1*(a1*a2 + a2*a4))/6)*td**3 + ((a1*a2)/2 + (a2*a4)/2)*td**2 + a2*td$

f12:=p3+p4

$p5:=((a3*(a1*(a1**2 + a2*a3) + a2*(a1*a3 + a3*a4)))/24 + (a4*(a3*(a1**2 + a2*a3) + a4*(a1*a3 + a3*a4)))/24)*td**4$

$p6:=((a3*(a1**2 + a2*a3))/6 + (a4*(a1*a3 + a3*a4))/6)*td**3 + ((a1*a3)/2 + (a3*a4)/2)*td**2 + a3*td$

f21:=p5+p6

$p7:=((a3*(a2*(a4**2 + a2*a3) + a1*(a1*a2 + a2*a4)))/24 + (a4*(a4*(a4**2 + a2*a3) + a3*(a1*a2 + a2*a4)))/24)*td**4$

$p8:=((a4*(a4**2 + a2*a3))/6 + (a3*(a1*a2 + a2*a4))/6)*td**3 + (a4**2/2 + (a2*a3)/2)*td**2 + a4*td + 1$

f22:=p7+p8

g11:=b3*((a1*f12)/(a1*a4 - a2*a3) - (a2*(f11 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)) - b1*((a3*f12)/(a1*a4 - a2*a3) - (a4*(f11 - 1))/(a1*a4 - a2*a3))

g12:=-1*(b4*((a1*f12)/(a1*a4 - a2*a3) - (a2*(f11 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)) - b2*((a3*f12)/(a1*a4 - a2*a3) - (a4*(f11 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)))

g21:=b1*((a4*f21)/(a1*a4 - a2*a3) - (a3*(f22 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)) - b3*((a2*f21)/(a1*a4 - a2*a3) - (a1*(f22 - 1))/(a1*a4 - a2*a3))

g22:=-1*(b2*((a4*f21)/(a1*a4 - a2*a3) - (a3*(f22 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)) - b4*((a2*f21)/(a1*a4 - a2*a3) - (a1*(f22 - 1))/(a1*a4 - a2*a3)))

s1:=-1*(-VREF+f11*(V1-V2)+f12*I0*r1-g12*IS*r2)/(g11)

vfp:=V1-V2

if s1>Portad then

OUT1:=1

else

OUT1:=0

endif

endif

ENDEXEC

ENDMODEL

Control PI

MODEL PIV

INPUT Vref,Portad,Vp,Vn

OUTPUT Sp

DATA Ki {dflt:1}

INVS {dflt:-1}

Kp {dflt:1}

VAR Sp,x,ay1,error1,ay2,Vrefa

HISTORY

integral(error1) {dflt: 0}

EXEC

Vrefa:=Vref*INVS

error1:=Vrefa-(Vp-Vn)

--PROPORCIONAL INTEGRAL

ay1:=integral(error1)

ay2:=ay1*Ki+error1*Kp

if ay2>Portad then

```
Sp:=1
else
Sp:=0
endif
```

```
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Control histéresis

```
MODEL histe
```

```
INPUT VSP,VSN,VREF
OUTPUT OUTP
DATA h {dflt:0.05}
      INVS {dflt:-1}
VAR OUTP,OUTN,res1,may1,may2,VREF2
```

```
EXEC
```

```
VREF2:=VREF*INVS
res1:=VREF2-(VSP-VSN)
```

```
if res1>h then
  may1:=1
else
  may1:=0
endif
if res1>h*-1 then
  may2:=1
else
  may2:=0
endif
```

```
if may1>may2 then
  OUTP:=may1
else
  OUTP:=may2
endif
```

```
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Señal portadora triangular

MODEL porta

OUTPUT SALIDA

DATA

Frec {dflt:10000}

Ampl {dflt:120}

VAR SALIDA,A2,Tp,m,ij,ay1

init

ij:=1

endinit

EXEC

A2:=2*AMPL

Tp:=1/Frec

m:=2*A2/Tp

if t>ij*Tp then

ij:=ij+1

endif

ay1:=Tp/2+(ij-1)*Tp

if t>=(ij-1)*Tp AND t<=ay1 then

SALIDA:=m*t-m*Tp*(1/2+ij-1)+A2

endif

if t>=ay1 AND t<=ij*Tp then

SALIDA:=-m*t+m*Tp*ij

endif

SALIDA:=SALIDA-AMPL

ENDEXEC

ENDMODEL

Cálculo señales referencia sistema monofásico

MODEL Monopre2

input AMPL,WT,WTC,PCC,IFA
OUTPUT VPRE,VFAS,VEOF

DATA Magpre {dflt:100}
 tar {dflt:5}
 delta {dflt:1.05}
 a {dflt:1}
 fp {dflt:0.8}

VAR VPRE,wt1,VFAS,b,c,disc,r1,r2,VEO,hue,wtref,isa,aopt,mageo,veo2,mn,veo1,veof,tdvr
 veo3,mref,fa,fa2,err,ap

init
mn:=0
wt1:=0
hue:=0
r1:=0
r2:=0
aopt:=0
mageo:=0
tdvr:=0
mref:=0
FA:=0
fa2:=0
err:=0
ap:=0
endinit

EXEC

mref:=mref+timestep*120*pi

if mref>=2*pi then mref:=0 endif

IF t>tar*1e-3 THEN

if (0.95*Magpre)>AMPL or not(IFA)=1then
 if wt1>=2*pi then
 wt1:=0
 else
 wt1:=wt1+timestep*120*pi
 endif

```

elseif (1.05*Magpre)<AMPL or not(IFA)=1 then

    if wt1>=2*pi then
        wt1:=0
    else
        wt1:=wt1+timestep*120*pi
    endif
else
    wt1:=WT
endif

IF (0.95*Magpre)>AMPL or (1.05*Magpre)<AMPL or not(IFA)=1 then
    hue:=1
ELSE
    hue:=0
ENDIF
fa:=hue

VPRE:=(Magpre*delta*sin(wt1)-AMPL*SIN(WT))*1/a
VFAS:=(Magpre*delta-AMPL)*SIN(WT)*1/a
    IF hue=1 THEN
        mn:= Magpre/AMPL*fp
        IF mn<=1 then
            aopt:=acos(fp)+(WT-mref)-(wt1-mref)-acos(mn)
        else
            aopt:=acos(fp)+(WT-mref)-(wt1-mref)
        ENDIF

        mageo:=sqrt(Magpre**2+AMPL**2-2*Magpre*AMPL*cos(aopt-((WT-mref)-(wt1-mref))))
        tdvr:=acos((Magpre*cos(aopt+(wt1-mref))-AMPL*cos(WT-mref))/mageo)
        veo2:=mageo*sin(120*pi*t+aopt)
        veo3:= mageo*sin(120*pi*t+tdvr)
        veo2:=veo3
        veo1:= (Magpre*sin(120*pi*t+aopt+(wt1-mref))-PCC)/a
        veof:=veo1
    ELSE
        veof:=0
        r1:=0
        isa:=0
        veo2:=0
        aopt:=0
        veo1:=0
        veo3:=0
        tdvr:=0
    ENDIF

```

```
ELSE
VEOF:=0
VFAS:=0
VPRE:=0
```

```
isa:=0
veo2:=0
aopt:=0
veo1:=0
veo3:=0
```

```
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Cálculo referencias sistema trifásico

```
MODEL compf
```

```
INPUT A,B,C,wta,maga,wtb,magb,magc,wtc,FAA,FB,FC
```

```
OUTPUT Ac,Bc,Cc,FAT
```

```
Data Magpre {dflt:100}
  fp {dflt:0.8}
  tar {dflt:5}
  escomp {dflt:1}
  r {dflt:10}
```

```
VAR Vapre,Vbpre,Vcpre,dc,qc,oc,d,q,o,hc,wt1,hue,x,y,mref,aopt,caeo,cbeo,cceo
veoa,veob,veoc,tdvra,tdvrb,tdvrc,da,db,dc,ua,ub,uc,va,vb,vc,wx,Ac,Bc,Cc
FAT,dcfase,qcfase,ocfase,dfase,qfase,ofase,Vafase,Vbfase,Vcfase,ele
```

```
init
hc:=0
wt1:=0
hue:=0
x:=0
y:=0
mref:=0
aopt:=0
da:=0
db:=0
dc:=0
va:=0
vb:=0
```

```

vc:=0
ua:=0
ub:=0
uc:=0
tdvra:=0
wx:=0
d:=0
q:=0
o:=0
dc:=0
qc:=0
oc:=0
dfase:=0
qfase:=0
ofase:=0
dcfase:=0
qcfase:=0
ocfase:=0
ele:=0

endinit

EXEC

FAT:=FAA and FB and FC

if escomp=4 then FAT:=1 endif
mref:=mref+timestep*120*pi

if mref>=2*pi then mref:=0 endif

IF t>tar*1e-3 then

if (0.95*Magpre)>maga or FAT=0 then
  if wt1>=2*pi then
    wt1:=0
  else
    wt1:=wt1+timestep*120*pi
  endif
elseif (1.05*Magpre)<maga or FAT=0 then

  if wt1>=2*pi then
    wt1:=0
  else
    wt1:=wt1+timestep*120*pi
  endif

```

```

else
  wt1:=wta
endif

--Cálculo compensación prehueco
d:=2/3*(A*sin(wt1)+B*sin(wt1-2*pi/3)+C*sin(wt1+2*pi/3))
q:=2/3*(A*cos(wt1)+B*cos(wt1-2*pi/3)+C*cos(wt1+2*pi/3))
o:=1/3*(A+B+C)

dc:=Magpre-d
qc:=-q
oc:=-o

Vapre:=(dc*sin(wt1)+qc*sin(wt1+90*pi/180)+oc)/r
Vbpre:=(dc*sin(wt1-2*pi/3)+qc*sin(wt1-2*pi/3+90*pi/180)+oc)/r
Vcpre:=(dc*sin(wt1+2*pi/3)+qc*sin(wt1+2*pi/3+90*pi/180)+oc)/r

--CÁLCULO COMPENSACIÓN EN FASE
dfase:=2/3*(A*sin(wta)+B*sin(wta-2*pi/3)+C*sin(wta+2*pi/3))
qfase:=2/3*(A*cos(wta)+B*cos(wta-2*pi/3)+C*cos(wta+2*pi/3))
ofase:=1/3*(A+B+C)

dcfase:=Magpre-dfase
qcfase:=-qfase
ocfase:=-ofase

Vafase:=(dcfase*sin(wta)+qcfase*sin(wta+90*pi/180)+ocfase)/r
Vbfase:=(dcfase*sin(wta-2*pi/3)+qcfase*sin(wta-2*pi/3+90*pi/180)+ocfase)/r
Vcfase:=(dcfase*sin(wta+2*pi/3)+qcfase*sin(wta+2*pi/3+90*pi/180)+ocfase)/r

-- COMPENSACIÓN ENERGÍA OPTIMIZADA

-- Detección hueco

if (1.05*Magpre)<maga or (1.05*Magpre)<magb or (1.05*Magpre)<maga then
  ele:=1
else
  ele:=0
endif

IF (0.95*Magpre)>maga or (0.95*Magpre)>magb or (0.95*Magpre)>magc or FAT=0 or ele=1 THEN
  hue:=1
ELSE
  hue:=0
ENDIF

```

```

IF hue=1 then

--Cálculo deltas

da:=(wta)-(wt1)
db:=(wtb)-(wt1)+120*pi/180
dc:=(wtc)-(wt1)-120*pi/180
--

x:=maga*cos(da)+magb*cos(db)+magc*cos(dc)
y:=maga*sin(da)+magb*sin(db)+magc*sin(dc)

--Condición compensación con cero energía activa

wx:=3*Magpre*fp/sqrt(x**2+y**2);
if sqrt(x**2+y**2)>=3*Magpre*fp then

    aopt:=acos(fp)+atan(y/x)-acos(3*Magpre*fp/sqrt(x**2+y**2))

else
    aopt:=acos(fp)+atan(y/x)
endif

veoa:=(Magpre*sin(120*pi*t+aopt+(wt1-mref))-A)/r
veob:=(Magpre*sin(120*pi*t+aopt+((wt1-120*pi/180)-mref))-B)/r
veoc:=(Magpre*sin(120*pi*t+aopt+((wt1+120*pi/180)-mref))-C)/r

ELSE

veoa:=0
veob:=0
veoc:=0
da:=0
db:=0
dc:=0

Vapre:=0
Vbpre:=0
Vcpre:=0
if escomp<>4 then
Vafase:=0
Vbfase:=0
Vcfase:=0
endif
ENDIF

```

```

ELSE

Vapre:=0
Vbpre:=0
Vcpre:=0

Vafase:=0
Vbfase:=0
Vcfase:=0

veoa:=0
veob:=0
veoc:=0
da:=0
db:=0
dc:=0

ENDIF

if escomp=1 then
  Ac:=Vapre
  Bc:=Vbpre
  Cc:=Vcpre

elseif escomp=2 or escomp=4 then

  Ac:=Vafase
  Bc:=Vbfase
  Cc:=Vcfase

else

  Ac:=veoa
  Bc:=veob
  Cc:=veoc

endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Control tensión barra de continua

```
MODEL CONP
```

```
INPUT VDCP,VDCN
```

```

OUTPUT CAR,DES

Data K {dflt:1}
      UMB {dflt:100}
      VCAP{dflt:1500}

VAR CAR,DES,ERROR,SOS

INIT
SOS:=0
ENDINIT

EXEC

ERROR:=K*((VDCP-VDCN)-VCAP)

IF ERROR>100 THEN
DES:=1
ELSE
DES:=0
ENDIF

IF SOS=1 AND ERROR<0 THEN
CAR:=1
ELSE
SOS:=0
IF ERROR<-UMB THEN
CAR:=1
SOS:=1
ELSE
CAR:=0
ENDIF
ENDIF

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Filtro lineal de Kalman, estimación componente fundamental

```

MODEL prue1

comment
Definición de Matrices

```

endcomment

INPUT in

OUTPUT out,out2,fa

DATA Frec {dflt:60}

P11 {dflt:10}

P22 {dflt:10}

X11 {dflt:0}

X21 {dflt:0}

R {dflt:0.05}

Q {dflt:0.05}

Porc {dflt:1.5}

tini {dflt:5}

VAR a0,b0,c0,d0,a,b,c,d,e0,f0,e,f,g,h,k,m,k11,k21,out,ay1,out2,frt,we,err,co,trt,gt
tre,fa

init

a0:=P11

b0:=0

c0:=0

d0:=P22

e0:=X11

f0:=X21

co:=0

frt:=0

trt:=0

gt:=1

tre:=0

endinit

EXEC

----- Asignación MATRIZ F-----

comment

F=[cos(2*pi*f*delta) -sin(2*pi*f*delta);

sin(2*pi*f*delta) cos(2*pi*f*delta)];

endcomment

g:=cos(2*pi*Frec*timestep)

h:=-sin(2*pi*frec*timestep)

k:=sin(2*pi*Frec*timestep)

m:=cos(2*pi*Frec*timestep)

```

-- Asignación 1=> P=P0;
a:=a0
b:=b0
c:=c0
d:=d0
-- Asignación 2 => x=x0;
e:=e0
f:=f0
-- Asignación 3=> K=P*[1 0]'*inv([1 0]*P*[1 0]'+0.05)--
k11:=a/(a+R)
k21:=c/(a+R)

-- Asignación 4=>x=x+K*(z(k)-[1 0]*x) ;
e:= e-(a*(e-in))/(a+R)
f:= f-(c*(e-in))/(a+R)

-- Asignación 4=>P=P-K*[1 0]*P;

a:= a - a**2/(a + 1/20)
b:= b - (a*b)/(a + 1/20)
c:= c - (a*c)/(a + 1/20)
d:= d - (b*c)/(a + 1/20)

-- Asignación 5 =>x0=F*x;
e0:=e*g + f*h
f0:=e*k + f*m

-- Asignación 6=>P0=F*P*F'+0.05*eye(2,2);

a0:= g*(a*g + c*h) + h*(b*g + d*h) + Q
b0:= k*(a*g + c*h) + m*(b*g + d*h)
c0:= g*(a*k + c*m) + h*(b*k + d*m)
d0:= k*(a*k + c*m) + m*(b*k + d*m) + Q

-- Asignación 6 => amplitud(k)=sqrt(x(1)*x(1)+x(2)*x(2));
ay1:= (e**2+f**2)
out:=ay1**(1/2)

err:=(out-frm)
if abs(err)>Porc and t>6e-3 then
if trt=0 or trt>10e-3 then
if co<2 then
a0:=P11
b0:=0
c0:=0

```

```

d0:=P22

co:=co+1
endif
endif

endif
if co>0 then
  trt:=trt+timestep
endif

if e>=0 then
  out2:=atan(f/e)+pi/2
else
  out2:=atan(f/e)+3*pi/2
endif

frt:=out

if abs(err)>Porc and t>8e-3 then
  gt:=0
endif

if gt=0 then
  tre:=tre+timestep
endif

if tre>tini*1e-3 then
  gt:=1
  tre:=0
endif

fa:=gt

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Filtro lineal de Kalman, estimación componente fundamental y armónico de orden quinto y séptimo

```

MODEL karmtr

--MODELO KALMAN 2 ARMÓNICOS

comment
Definición de Matrices

```

Matriz transición de estados

```
M=| a[1] a[2] 0 0 0 0 |
   |-a[2] a[1] 0 0 0 0 |
   | 0 0 b[1] b[2] 0 0 |
   | 0 0 -b[2] b[1] 0 0 |
   | 0 0 0 0 c[1] c[2]|
   | 0 0 0 0 -c[2] c[1]|
```

```
P= |d[1] d[2] d[3] d[4] d[5] d[6]|
   |e[1] e[2] e[3] e[4] e[5] e[6]|
   |f[1] f[2] f[3] f[4] f[5] f[6]|
   |g[1] g[2] g[3] g[4] g[5] g[6]|
   |h[1] h[2] h[3] h[4] h[5] h[6]|
   |i[1] i[2] i[3] i[4] i[5] i[6]|
```

X= x[1..6]

endcomment

INPUT in

OUTPUT amp1,fase1,fa

DATA Frec {dflt:60}

n1 {dflt:3}

n2 {dflt:5}

P11 {dflt:100}

R {dflt:0.05}

Q {dflt:0.05}

Porc {dflt:0.05}

P22 {dflt:100}

tini {dflt:5e-3}

VAR a[1..2],b[1..2],c[1..2],e0[1..6],f0[1..6],g0[1..6],h0[1..6],i0[1..6]

x[1..6],x0[1..6],div

ay1,a,d0[1..6]

e1,e2,e3,e4,e5,e6,f1,f2,f3,f4,f5,f6,g1,g2,g3,g4,g5,g6,h1,h2,h3,h4,h5,h6

i1,i2,i3,i4,i5,i6,d1,d2,d3,d4,d5,d6,amp1,fase1,a1,b1,c1,a2,b2,c2,s1,s2,s3

k1,k2,k3,k4,k5,k6,t1,t2,t3,u1,u2,u3,v1,v2,v3,w1,w2,w3,amp2,fase2,amp3

fase3,err,trt,frt,co,we,frt,gt,tre,FA

init

a[1]:=cos(Frec*2*pi*timestep)

a[2]:=-sin(Frec*2*pi*timestep)

b[1]:=cos(n1*Frec*2*pi*timestep)

b[2]:=-sin(n1*Frec*2*pi*timestep)

c[1]:=cos(n2*Frec*2*pi*timestep)

```
c[2]:=-sin(n2*Frec*2*pi*timestep)
frt:=0
```

```
d0[1]:=P11
d0[2..6]:=0
e0[1]:=0
e0[2]:=P11
e0[3..6]:=0
f0[1..2]:=0
f0[3]:=P11
f0[4..6]:=0
g0[1..3]:=0
g0[4]:=P11
g0[5..6]:=0
h0[1..4]:=0
h0[5]:=P11
h0[6]:=0
i0[1..5]:=0
i0[6]:=P11
```

```
a1:=a[1]
a2:=a[2]
b1:=b[1]
b2:=b[2]
c1:=c[1]
c2:=c[2]
```

```
co:=0
trt:=0
frt:=0
gt:=1
tre:=0
```

```
x0[1..6]:=0
endinit
```

```
EXEC
```

```
----- Asignación MATRIZ F-----
```

```
comment
```

```
err:=(in-frt)
```

```
if abs(err)>Porc and t>6e-3 then
```

```
if trt=0 or trt>5e-3 then
```

```
d0[1]:=P11
d0[2..6]:=P22
e0[1]:=P22
```

```

e0[2]:=P11
e0[3..6]:=P22
f0[1..2]:=P22
f0[3]:=P11
f0[4..6]:=P22
g0[1..3]:=P22
g0[4]:=P11
g0[5..6]:=P22
h0[1..4]:=P22
h0[5]:=P11
h0[6]:=P22
i0[1..5]:=P22
i0[6]:=P11

x0[1..6]:=0
co:=co+1
endif

we:=1
else
we:=0
endif
if co>0 then
trt:=trt+timestep
endif
endcomment
-- Asignación 1=> P=P0;

d1:= d0[1]
d2:= d0[2]
d3:= d0[3]
d4:= d0[4]
d5:= d0[5]
d6:= d0[6]

e1:= e0[1]
e2:= e0[2]
e3:= e0[3]
e4:= e0[4]
e5:= e0[5]
e6:= e0[6]

f1:= f0[1]
f2:= f0[2]
f3:= f0[3]
f4:= f0[4]

```

```

f5:= f0[5]
f6:= f0[6]

g1:= g0[1]
g2:= g0[2]
g3:= g0[3]
g4:= g0[4]
g5:= g0[5]
g6:= g0[6]

h1:= h0[1]
h2:= h0[2]
h3:= h0[3]
h4:= h0[4]
h5:= h0[5]
h6:= h0[6]

i1:= i0[1]
i2:= i0[2]
i3:= i0[3]
i4:= i0[4]
i5:= i0[5]
i6:= i0[6]

-- Asignación 2 => x=x0;
x[1..6]:=x0[1..6]

-- Asignación 3=> K=P*[1 0]'*inv([1 0]*P*[1 0]'+0.05)--

div:=R + d1 + d3 + d5 + f1 + f3 + f5 + h1 + h3+ h5

k1:= (d1 + d3 + d5)/div
k2:= (e1 + e3 + e5)/div
k3:= (f1 + f3 + f5)/div
k4:= (g1 + g3 + g5)/div
k5:= (h1 + h3 + h5)/div
k6:= (i1 + i3 + i5)/div

-- Asignación 4=>x=x+K*(z(k)-[1 0]*x) ;

x[1]:=x[1] - k1*(x[1] - IN + x[3] + x[5])
x[2]:=x[2] - k2*(x[1] - IN + x[3] + x[5])
x[3]:=x[3] - k3*(x[1] - IN + x[3] + x[5])
x[4]:=x[4] - k4*(x[1] - IN + x[3] + x[5])
x[5]:=x[5] - k5*(x[1] - IN + x[3] + x[5])

```

$$x[6]:=x[6] - k6*(x[1] - IN + x[3] + x[5])$$

-- Asignación 4=>P=P-K*[1 0]*P;

$$d1:=d1 - d1*k1 - f1*k1 - h1*k1$$

$$d2:=d2 - d2*k1 - f2*k1 - h2*k1$$

$$d3:=d3 - d3*k1 - f3*k1 - h3*k1$$

$$d4:=d4 - d4*k1 - f4*k1 - h4*k1$$

$$d5:=d5 - d5*k1 - f5*k1 - h5*k1$$

$$d6:=d6 - d6*k1 - f6*k1 - h6*k1$$

$$e1:=e1 - d1*k2 - f1*k2 - h1*k2$$

$$e2:=e2 - d2*k2 - f2*k2 - h2*k2$$

$$e3:=e3 - d3*k2 - f3*k2 - h3*k2$$

$$e4:=e4 - d4*k2 - f4*k2 - h4*k2$$

$$e5:=e5 - d5*k2 - f5*k2 - h5*k2$$

$$e6:=e6 - d6*k2 - f6*k2 - h6*k2$$

$$f1:=f1 - d1*k3 - f1*k3 - h1*k3$$

$$f2:=f2 - d2*k3 - f2*k3 - h2*k3$$

$$f3:=f3 - d3*k3 - f3*k3 - h3*k3$$

$$f4:=f4 - d4*k3 - f4*k3 - h4*k3$$

$$f5:=f5 - d5*k3 - f5*k3 - h5*k3$$

$$f6:=f6 - d6*k3 - f6*k3 - h6*k3$$

$$g1:=g1 - d1*k4 - f1*k4 - h1*k4$$

$$g2:=g2 - d2*k4 - f2*k4 - h2*k4$$

$$g3:=g3 - d3*k4 - f3*k4 - h3*k4$$

$$g4:=g4 - d4*k4 - f4*k4 - h4*k4$$

$$g5:=g5 - d5*k4 - f5*k4 - h5*k4$$

$$g6:=g6 - d6*k4 - f6*k4 - h6*k4$$

$$h1:=h1 - d1*k5 - f1*k5 - h1*k5$$

$$h2:=h2 - d2*k5 - f2*k5 - h2*k5$$

$$h3:=h3 - d3*k5 - f3*k5 - h3*k5$$

$$h4:=h4 - d4*k5 - f4*k5 - h4*k5$$

$$h5:=h5 - d5*k5 - f5*k5 - h5*k5$$

$$h6:=h6 - d6*k5 - f6*k5 - h6*k5$$

$$i1:=i1 - d1*k6 - f1*k6 - h1*k6$$

$$i2:=i2 - d2*k6 - f2*k6 - h2*k6$$

$$i3:=i3 - d3*k6 - f3*k6 - h3*k6$$

$$i4:=i4 - d4*k6 - f4*k6 - h4*k6$$

$$i5:=i5 - d5*k6 - f5*k6 - h5*k6$$

$$i6:=i6 - d6*k6 - f6*k6 - h6*k6$$

-- Pruebas

s1:=d1
s2:=d3
s3:=d6

t1:=e1
t2:=e3
t3:=e5

v1:=f1
v2:=f3
v3:=f6

w1:=g1
w2:=g3
w3:=g6

-- Asignación 5 =>x0=F*x;

x0[1]:=a1*x[1] + a2*x[2]
x0[2]:=a1*x[2] - a2*x[1]
x0[3]:=b1*x[3] + b2*x[4]
x0[4]:=b1*x[4] - b2*x[3]
x0[5]:=c1*x[5] + c2*x[6]
x0[6]:=c1*x[6] - c2*x[5]

-- Asignación 6=>P0=F*P*F'+0.05*eye(2,2);

d0[1]:=Q + a1*(a1*d1 + a2*e1) + a2*(a1*d2 + a2*e2)
d0[2]:=a1*(a1*d2 + a2*e2) - a2*(a1*d1 + a2*e1)
d0[3]:=b1*(a1*d3 + a2*e3) + b2*(a1*d4 + a2*e4)
d0[4]:=b1*(a1*d4 + a2*e4) - b2*(a1*d3 + a2*e3)
d0[5]:=c1*(a1*d5 + a2*e5) + c2*(a1*d6 + a2*e6)
d0[6]:=c1*(a1*d6 + a2*e6) - c2*(a1*d5 + a2*e5)

e0[1]:= -1*a1*(a2*d1 - a1*e1) - a2*(a2*d2 - a1*e2)
e0[2]:=Q + a2*(a2*d1 - a1*e1) - a1*(a2*d2 - a1*e2)
e0[3]:=-1*b1*(a2*d3 - a1*e3) - b2*(a2*d4 - a1*e4)
e0[4]:=b2*(a2*d3 - a1*e3) - b1*(a2*d4 - a1*e4)
e0[5]:=-c1*(a2*d5 - a1*e5) - c2*(a2*d6 - a1*e6)
e0[6]:=c2*(a2*d5 - a1*e5) - c1*(a2*d6 - a1*e6)

f0[1]:=a1*(b1*f1 + b2*g1) + a2*(b1*f2 + b2*g2)
f0[2]:= a1*(b1*f2 + b2*g2) - a2*(b1*f1 + b2*g1)

```

f0[3]:= Q + b1*(b1*f3 + b2*g3) + b2*(b1*f4 + b2*g4)
f0[4]:=b1*(b1*f4 + b2*g4) - b2*(b1*f3 + b2*g3)
f0[5]:= c1*(b1*f5 + b2*g5) + c2*(b1*f6 + b2*g6)
f0[6]:= c1*(b1*f6 + b2*g6) - c2*(b1*f5 + b2*g5)

g0[1]:=-a1*(b2*f1 - b1*g1) - a2*(b2*f2 - b1*g2)
g0[2]:=a2*(b2*f1 - b1*g1) - a1*(b2*f2 - b1*g2)
g0[3]:=-b1*(b2*f3 - b1*g3) - b2*(b2*f4 - b1*g4)
g0[4]:=Q + b2*(b2*f3 - b1*g3) - b1*(b2*f4 - b1*g4)
g0[5]:=-c1*(b2*f5 - b1*g5) - c2*(b2*f6 - b1*g6)
g0[6]:=c2*(b2*f5 - b1*g5) - c1*(b2*f6 - b1*g6)

h0[1]:=a1*(c1*h1 + c2*i1) + a2*(c1*h2 + c2*i2)
h0[2]:=a1*(c1*h2 + c2*i2) - a2*(c1*h1 + c2*i1)
h0[3]:=b1*(c1*h3 + c2*i3) + b2*(c1*h4 + c2*i4)
h0[4]:= b1*(c1*h4 + c2*i4) - b2*(c1*h3 + c2*i3)
h0[5]:=Q + c1*(c1*h5 + c2*i5) + c2*(c1*h6 + c2*i6)
h0[6]:=c1*(c1*h6 + c2*i6) - c2*(c1*h5 + c2*i5)

i0[1]:=-a1*(c2*h1 - c1*i1) - a2*(c2*h2 - c1*i2)
i0[2]:=a2*(c2*h1 - c1*i1) - a1*(c2*h2 - c1*i2)
i0[3]:=-b1*(c2*h3 - c1*i3) - b2*(c2*h4 - c1*i4)
i0[4]:= b2*(c2*h3 - c1*i3) - b1*(c2*h4 - c1*i4)
i0[5]:=-c1*(c2*h5 - c1*i5) - c2*(c2*h6 - c1*i6)
i0[6]:=Q + c2*(c2*h5 - c1*i5) - c1*(c2*h6 - c1*i6)

-- Asignación 6 => amplitud(k)=sqrt(x(1)*x(1)+x(2)*x(2));

--AMPLITUD ARMÓNICO A
ay1:= (x[1]**2+x[2]**2)
amp1:=ay1**(1/2)
--FASE ARMÓNICO A
if x[1]>=0 then
  fase1:=atan(x[2]/x[1])+pi/2
else
  fase1:=atan(x[2]/x[1])+3*pi/2
endif

--AMPLITUD ARMÓNICO B

amp2:=sqrt(x[3]**2+x[4]**2)

--FASE ARMÓNICO B
if x[3]>=0 then
  fase2:=atan(x[4]/x[3])+pi/2

```

```

else
  fase2:=atan(x[4]/x[3])+3*pi/2
endif

--AMPLITUD ARMÓNICO C

amp3:=sqrt(x[5]**2+x[6]**2)

--FASE ARMÓNICO C
if x[5]>=0 then
  fase3:=atan(x[6]/x[5])+pi/2
else
  fase3:=atan(x[6]/x[5])+3*pi/2
endif

err:=(amp1-frt)

if t=0 then
  gt:=0
else
  gt:=1
endif

if abs(err)>Porc and t>10e-3 then
  gt:=0
endif

if gt=0 then
  tre:=tre+timestep
endif

if tre>tini*1e-3 then
  gt:=1
  tre:=0
endif

fa:=gt

frt:=amp1

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Negador

MODEL NOTM

-- MODELO NEGADOR --

INPUT IN
OUTPUT OUT
VAR OUT

EXEC

OUT:=NOT(IN)

ENDEXEC
ENDMODEL

Medidor potencia activa

MODEL potmed

DATA freq {dflt:60} -- base frequency
inip {dflt:0} --

INPUT v1 -- nodo tensión 1
v2 -- nodo tensión 2
ic -- corriente
VAR pot -- POTENCIA
ay1 -- v*ic
ipot -- integral
period,w -- 1/freq

OUTPUT pot
DELAY CELLS(ipot): 1/freq/timestep +1
INIT
period := recip(freq)
histdef(ipot) := 0
integral(ay1) := 0
IF inip < 0 THEN pot:=0 ELSE pot:=inip ENDIF
w:=0

ENDINIT
EXEC

ay1 := (v1-v2)*ic
ipot := integral(ay1)

```
IF t>period THEN
  w:=delay(ipot, period)
  pot := (ipot - delay(ipot, period))/period
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Selector

```
MODEL selec2

INPUT IN1,IN2,IN3

OUTPUT OUT

Data Sel {dflt:1}

VAR OUT

EXEC

IF SEL=1 then
  OUT:=IN1
ELSIF SEL=2 THEN
  OUT:=IN2
ELSIF SEL=3 THEN
  OUT:=IN3

ENDIF

ENDEXEC
ENDMODEL
```

Anexo B. Gráfica de resultados de simulaciones adicionales.

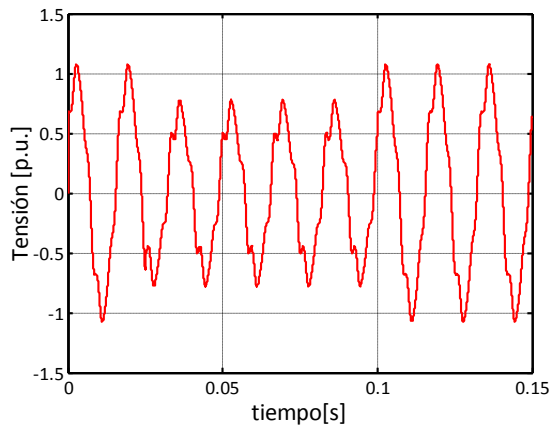
Resultados simulación hueco de tensión-componente armónica

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en el capítulo 4 y comprobar el correcto funcionamiento del DVR ante la combinación de dos tipos de perturbaciones en un mismo instante se muestra a continuación los gráficos obtenidos a partir de la simulación de:

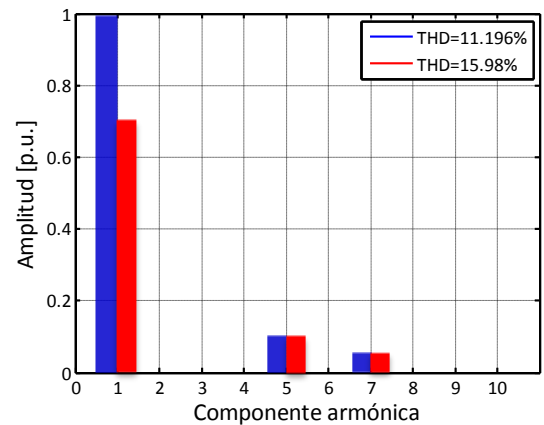
- Hueco de tensión de 0,3 p.u y salto de fase 0° con inicio en 0,025 segundos y final en 0,1 segundos.
- Componentes armónicas de tensión de 5 y 7 orden con magnitud de 0,1 y 0,05 en p.u del fundamental respectivamente.

Los gráficos de la siguiente figura corresponden a:

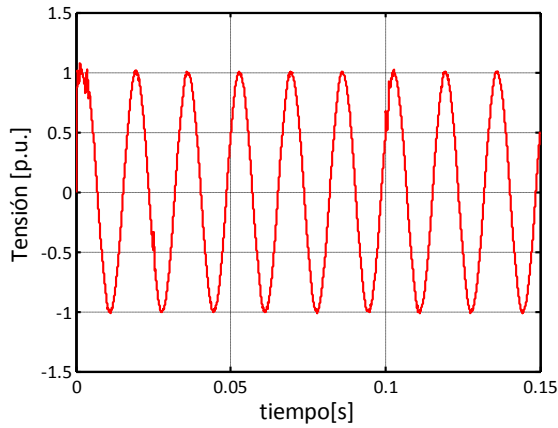
- Figura B.1.a. Tensión de alimentación quinto y séptimo armónico de amplitud de 0,1 y 0,05 p.u del fundamental respectivamente.
- Figura B.1.b. Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación.
- Figura B.1.c. Tensión compensada en la carga.
- Figura B.1.d. Magnitud del espectro armónico de la tensión en la carga.
- Figura B.1.e. Tensión inyectada por el DVR.
- Figura B.1.f. Magnitud de la tensión por armónico estimada a través del filtro de Kalman.
- Figura B.1.g. Potencia activa inyectada por el DVR.
- Figura B.1.h. Tensión en la barra de continua.



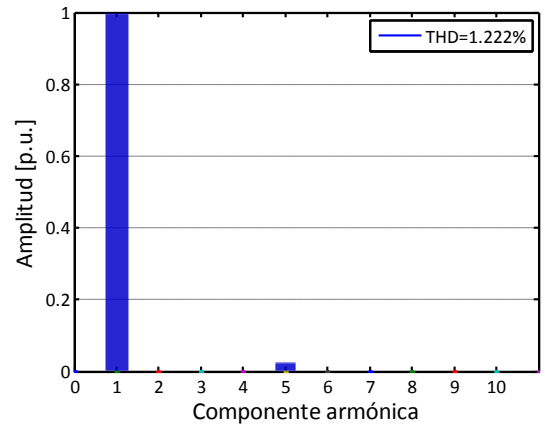
a) Tensión de alimentación.



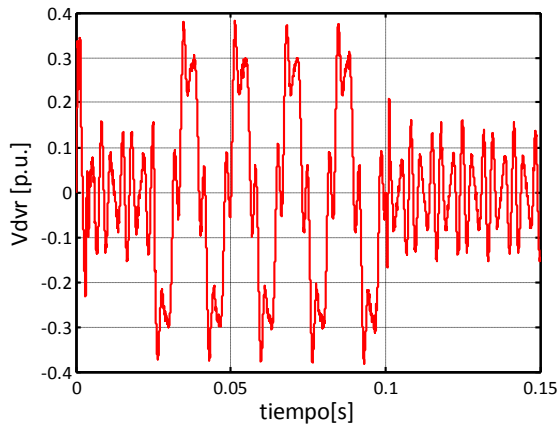
b) Magnitud del espectro armónico de la tensión de alimentación.



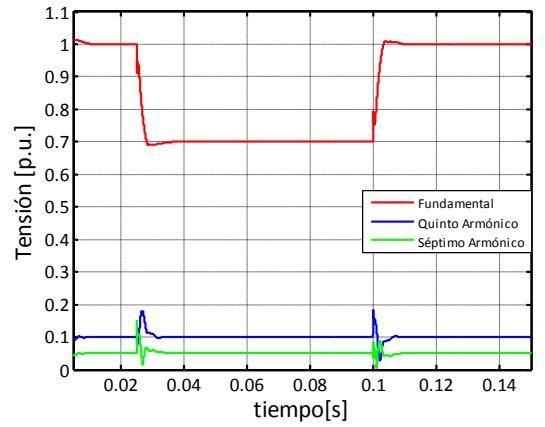
c) Tensión en la carga.



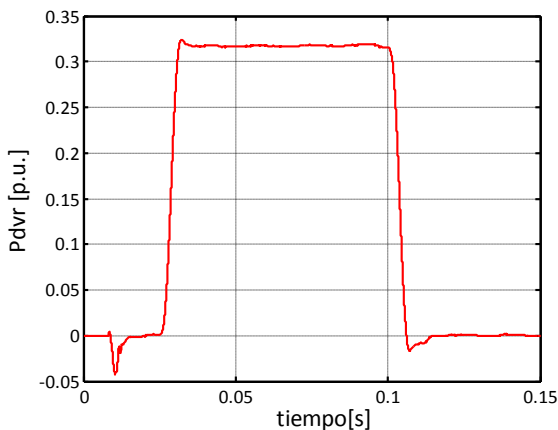
d) Magnitud del espectro armónico de la tensión en la carga.



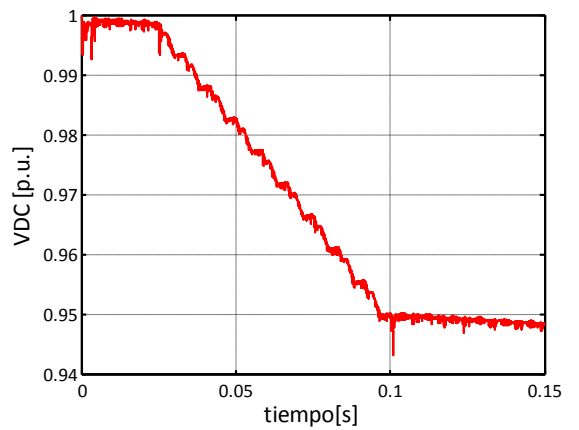
e) Tensión inyectada por DVR.



f) Magnitud de la tensión por armónico estimado a través del filtro de Kalman.



g) Potencia activa inyectada por el DVR.



h) Tensión en la barra de continua.

Figura B.1. Resultados de simulación monofásica hueco de tensión-componentes armónicas.

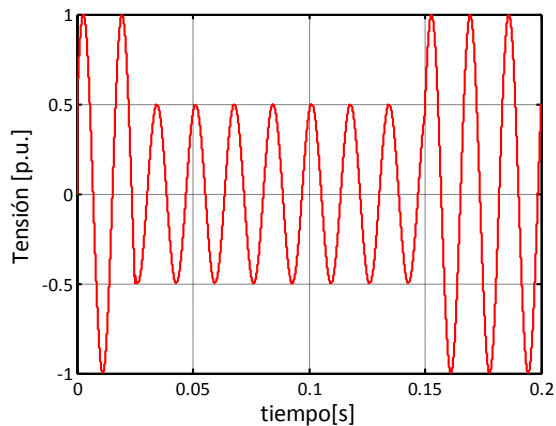
A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación de los modelos monofásicos para el DVR con control en el convertidor por Histéresis y PI, los cuales no se presentan en el capítulo 4 ya que presentan leves desventajas en el seguimiento de la señal de referencia comparados con el control predictivo Deadbeat.

Para el análisis con Histéresis se simuló un hueco de tensión de 0,5 en p.u de la tensión fundamental de alimentación y un salto de fase de 35°, el hueco inicia en 0,025 segundos y finaliza en 0,15 segundos. La estrategia de compensación utilizada en este caso es en pre-falla.

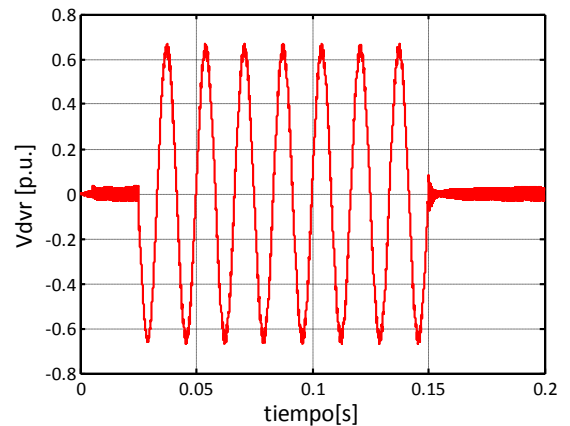
La siguiente figura presenta:

- Figura B.2.a. Tensión de alimentación.
- Figura B.2.b. Tensión inyectada por el DVR.
- Figura B.2.c. Tensión compensada en la carga.
- Figura B.2.d. Potencia activa inyectada por el DVR.
- Figura B.2.e. Tensión en la barra de continua.

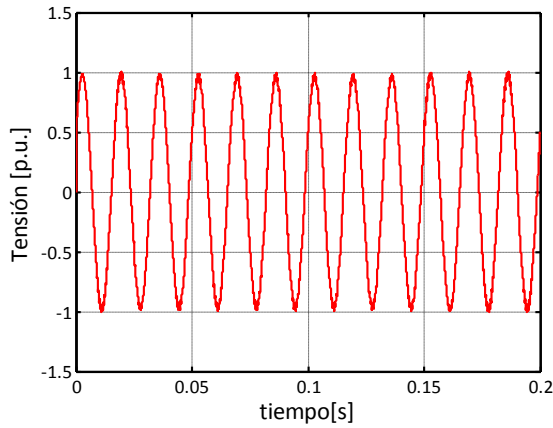
Para las demás figuras presentadas en el anexo B el orden de cada uno de los gráficos corresponderá al mismo de la Figura B.2.



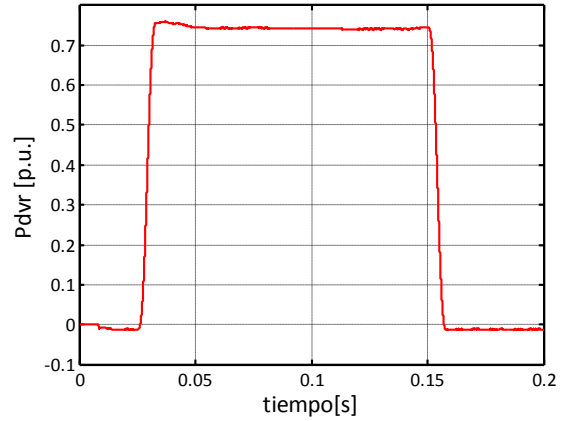
a) Tensión de alimentación.



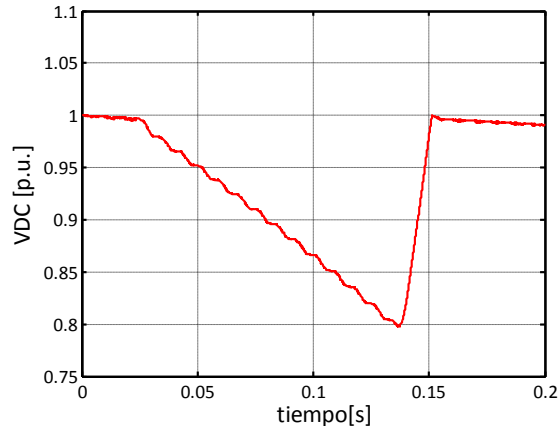
b) Tensión inyectada por el DVR.



c) Tensión en la carga.



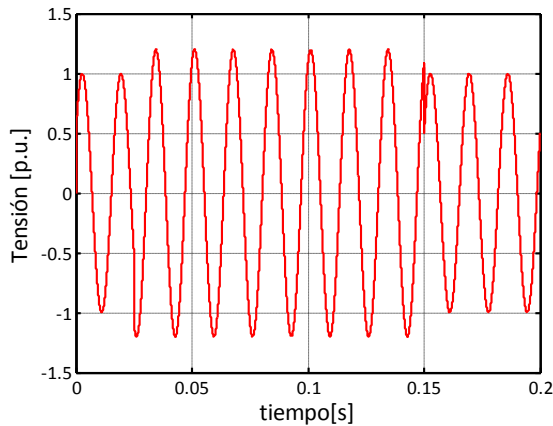
d) Potencia activa inyectada por el DVR.



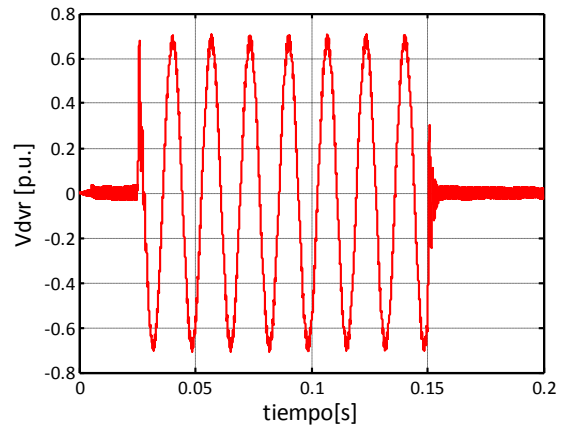
e) Tensión en la barra de continua.

Figura B.2. Resultados de simulación DVR monofásico para huecos de tensión, control del convertidor por histéresis.

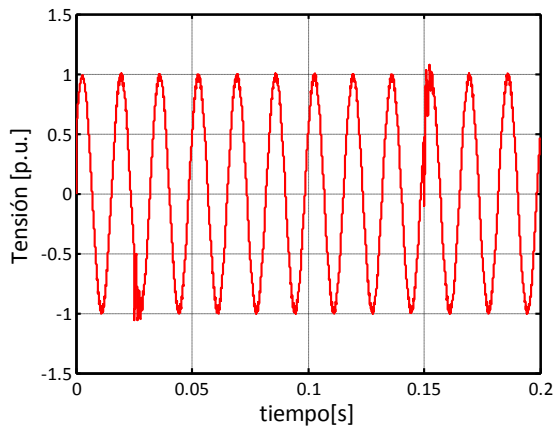
Para el control por histéresis además se analiza una elevación de tensión de 0.2 en p.u y salto de fase de 35°, para los mismos tiempos establecidos en el hueco de tensión.



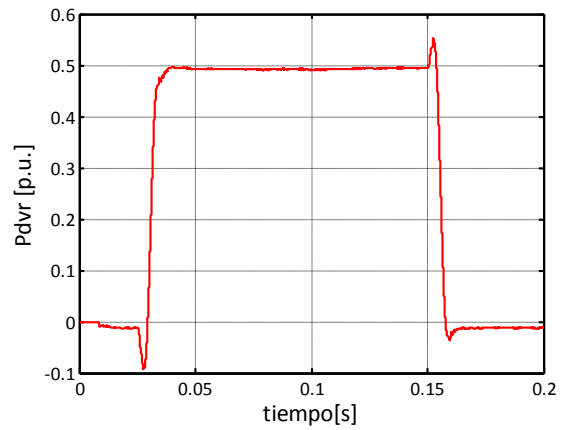
a) Tensión de alimentación.



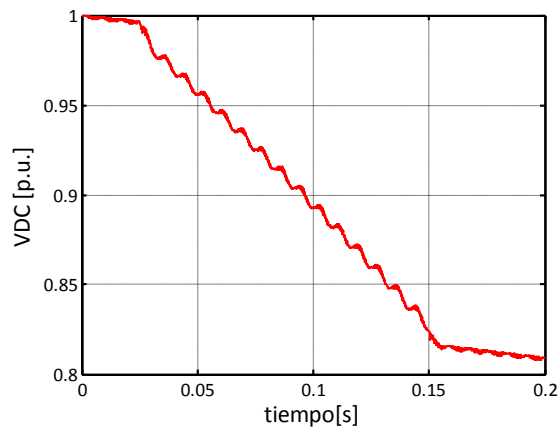
b) Tensión inyectada por el DVR.



c) Tensión en la carga.



d) Potencia activa inyectada por el DVR.

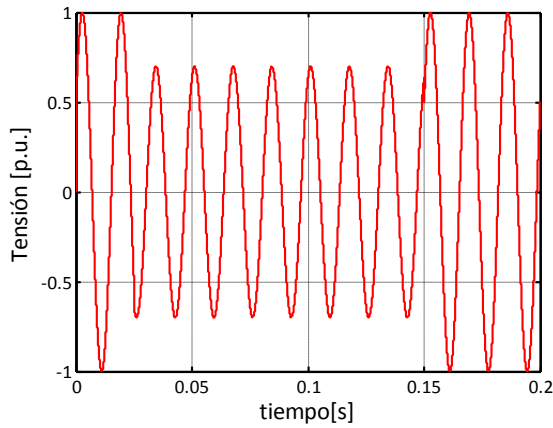


e) Tensión en la barra de continua.

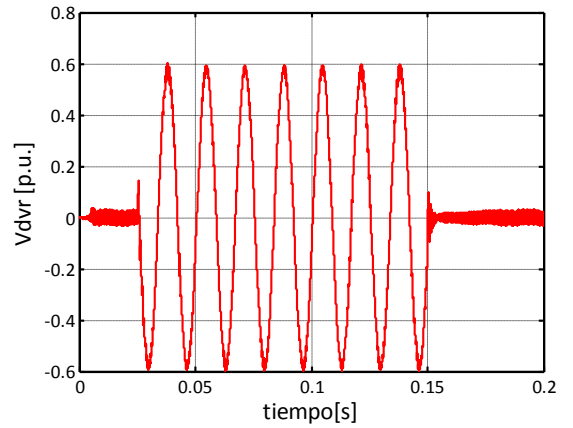
Figura B.3. Resultados de simulación DVR monofásico para elevaciones de tensión, control del convertidor por histéresis.

Resultados de simulación modelo DVR control en el convertidor PI

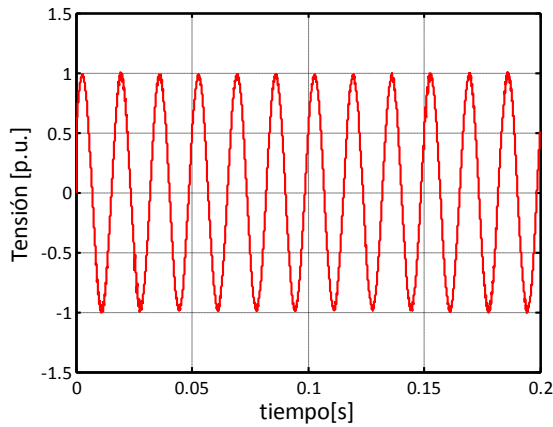
Para el análisis con el control PI se simulo un hueco de tensión de 0.5 en p.u de la tensión fundamental de alimentación y un salto de fase de 35°, el hueco inicia en 0,025 segundos y finaliza en 0,15 segundos. La estrategia de compensación utilizada en este caso es en pre-falla.



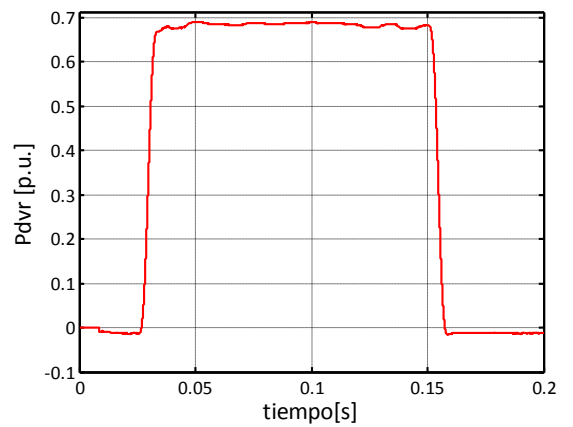
a) Tensión de alimentación.



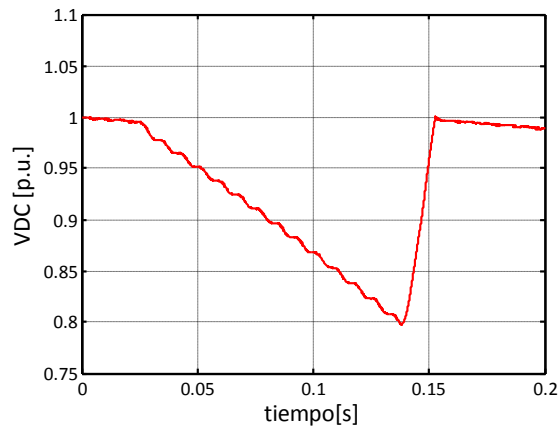
b) Tensión inyectada por el DVR.



c) Tensión en la carga.



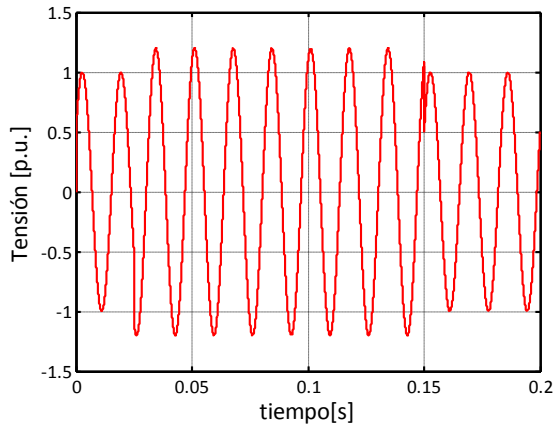
d) Potencia activa inyectada por el DVR.



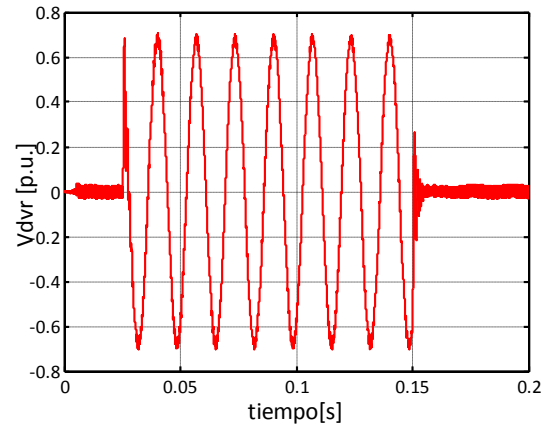
e) Tensión en la barra de continua.

Figura B.4. Resultados de simulación DVR monofásico para huecos de tensión, control del convertidor PI.

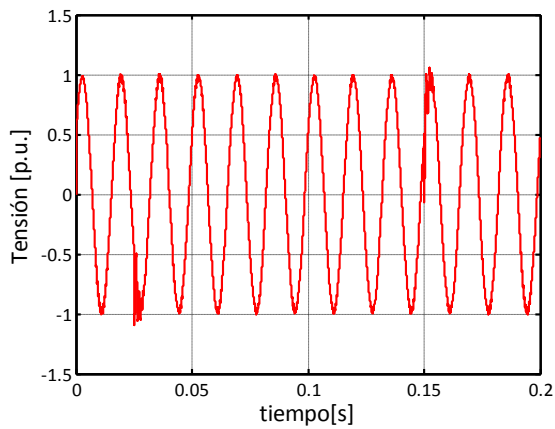
Para el caso de una elevación de tensión de 0,2 en p.u y salto de fase de 35°, para los mismos tiempos establecidos en el hueco de tensión, se obtuvieron las siguientes gráficas.



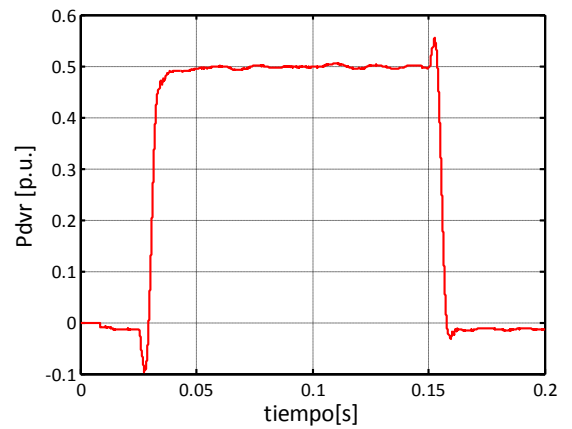
a) Tensión de alimentación.



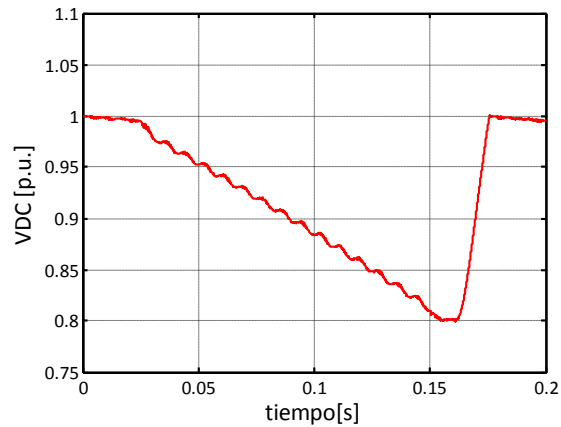
b) Tensión inyectada por el DVR.



c) Tensión en la carga.



d) Potencia activa inyectada por el DVR.



e) Tensión en la barra de continua.

Figura B.5. Resultados de simulación DVR monofásico para elevaciones de tensión, control del convertidor PI.