

# INDUSTRIALES

## ETSII | UPM

Compensación de desequilibrios en redes eléctricas mediante convertidores electrónicos de potencia y redes de secuencia

FEBRERO 2017

TRABAJO FIN DE GRADO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO EN GRADUADO EN  
INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**Pilar Quintana Hurtado**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE  
GRADO:

**Marcos Lafoz Pastor**



## ÍNDICE

Índice de figuras .....	5
Índice de tablas .....	9
1. Resumen.....	11
2. Introducción y objetivos del Trabajo.....	13
3. Estado del arte .....	15
3.1 Sistemas trifásicos desequilibrados .....	15
3.2 Efectos de los desequilibrios .....	17
3.2.1 Efectos sobre las máquinas eléctricas.....	18
3.2.2 Efectos sobre accionamientos variadores de velocidad .....	19
3.3 Equilibrado de sistemas trifásicos desequilibrados .....	21
4. Fundamento teórico.....	25
5. Descripción del modelo.....	35
6. PARTE 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertido electrónico.....	53
6.1 CASO 1: Carga trifásica con el mismo consumo en las tres fases .....	55
6.2 CASO 2: Carga trifásica con consumo distinto en una de las tres fases.....	61
6.3 CASO 3: Carga trifásica con consumo distinto en las tres fases.....	65
6.4 CASO 4: Carga entre dos fases y neutro con consumo nulo en la otra.....	66
6.5 CASO 5: Carga entre una fase y neutro con consumo nulo en las otras dos .....	70
6.6 CASO 6: Estudio ante la variación del nivel de carga .....	73
7. PARTE 2: Suministro de potencia por parte de la red y equilibrado de fases por parte del convertidor electrónico.....	79
7.1 CASO 1: Carga trifásica con el mismo consumo en las tres fases .....	81
7.2CASO 2: Carga trifásica con consumo distinto en una de las tres fases.....	86
7.3 CASO 3: Carga trifásica con consumo distinto en las tres fases.....	89

## Índice

7.4 Caso 4: Carga entre dos fases y neutro con consumo nulo en la otra .....	92
7.5 CASO 5: Carga entre una fase y neutro con consumo nulo en las otras dos .....	95
7.6 Caso 6: Estudio ante la variación del nivel de carga .....	96
8. Conclusiones del estudio.....	99
8.1 Conclusiones de la parte 1 .....	100
8.2 Conclusiones de la parte 2 .....	100
9. Líneas futuras de trabajo.....	103
10. Planificación .....	105
11. Presupuesto .....	109
12. Referencias.....	111
<b>Anexo I: Código de Matlab de la estrategia de modulación SVM.....</b>	<b>113</b>
<b>Anexo II: Código de Matlab para la realización de las transformaciones en redes de secuencia.....</b>	<b>123</b>
<b>II.1 Transformación ab-dq de secuencia directa.....</b>	<b>123</b>
<b>II.2 Transformación ab-dq de secuencia inversa .....</b>	<b>123</b>
<b>II.3 Transformada dq-ab de secuencia directa .....</b>	<b>124</b>
<b>II.4 Transformada dq-ab de secuencia inversa .....</b>	<b>127</b>
<b>II.5 Obtención del ángulo theta de giro.....</b>	<b>127</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado de tensiones en secuencia directa, inversa y homopolar .....	15
Figura 2: Aumento de la temperatura en las máquinas eléctricas en función del grado de desequilibrio.....	18
Figura 3: Estructura típica de un accionamiento variador de velocidad.....	19
Figura 4: Espectro de los armónicos de corriente en una situación equilibrada .....	20
Figura 5: Espectro de los armónicos de corriente para un nivel de desequilibrio de (a) 0.3% y (b) 3.75%.....	21
Figura 6: Carga monofásica conectada a una red trifásica, a través de un transformador de Steinmetz .....	22
Figura 7: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos equilibrados.....	25
Figura 8: Suma de las tres componentes equilibradas para dar lugar a las componentes desequilibradas .....	26
Figura 9: Esquemas para la extracción de las componentes de secuencia directa e inversa mediante el uso de filtros .....	29
Figura 10: Esquema del método DSC para la extracción de las componentes de secuencia directa e inversa .....	30
Figura 11: Esquema general del circuito de potencia .....	35
Figura 12: Esquema general del sistema de control .....	36
Figura 13: Diagrama XY de un sistema trifásico desequilibrado (izquierda) y de un sistema trifásico equilibrado (derecha).....	37
Figura 14: Esquema de Matlab-Simulink de separación en redes de secuencia .....	38
Figura 15: Esquema de control por banda de histéresis.....	41
Figura 16: Forma de la onda de corriente de salida en control con banda de histéresis .....	41
Figura 17: Comparación de señal moduladora y portadora en modulación sinusoidal PWM ...	42
Figura 18: Reguladores PI para la obtención de las tensiones de referencia .....	44
Figura 19: Corrientes de salida del inversor introduciendo las ecuaciones de desacoplo en la regulación.....	45

## Índice de figuras

Figura 20: Corrientes de salida del inversor sin introducir las ecuaciones de desacoplo en la regulación.....	45
Figura 21: Esquema de Matlab-Simulink de la transformación inversa a partir de las redes de secuencia.....	47
Figura 22: Representación de los ocho posibles vectores espaciales en el plano .....	48
Figura 23: Disposición y numeración de los interruptores y los diodos en el inversor .....	48
Figura 24: Representación del vector tensión de referencia y sus dos vectores espaciales adyacentes .....	50
Figura 25: Esquema general de la Parte 1 del estudio.....	53
Figura 26: Esquema en Matlab-Simulink del circuito de potencia.....	54
Figura 27: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de control .....	55
Figura 28: Caso 1. Medida de corriente en la carga en componentes trifásicas .....	56
Figura 29: Caso 1. Corrientes en la carga en redes de secuencia .....	56
Figura 30: Corriente en la carga para el caso 1 si la red fuera de secuencia inversa.....	57
Figura 31: Caso 1. Corrientes en el inversor en redes de secuencia.....	58
Figura 32: Caso 1. Comparación entre la corriente en la carga y la corriente en el inversor .....	58
Figura 33: Caso 1. Corrientes de salida del inversor sin filtrar .....	59
Figura 34: Caso 1. Corrientes de salida del inversor filtradas .....	59
Figura 35: Caso 1. Comparación entre corriente de salida del inversor y corriente en la carga .....	60
Figura 36: Tensión pulsada a la salida del inversor.....	60
Figura 37: Caso 2. Corriente en la carga.....	61
Figura 38: Caso 2. Corriente en la carga en redes de secuencia .....	62
Figura 39: Caso 2. Corrientes del inversor en redes de secuencia.....	62
Figura 40: Caso 2. Comparación entre la corriente en la carga y la corriente en el inversor .....	63
Figura 41: Caso 2. Comparación del transitorio con y sin ecuaciones de desacoplo.....	64
Figura 42: Caso 2. Comparación entre corriente de salida del inversor y corriente en la carga .....	64
Figura 43: Caso 3. Medida de corrientes en la carga .....	65
Figura 44: Caso 3. Medida de las corrientes en la carga en redes de secuencia .....	66
Figura 45: Caso 3. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia .....	66
Figura 46: Caso 4. Medida de las corrientes en la carga.....	67
Figura 47: Caso 4. Corrientes en la carga en redes de secuencia .....	68
Figura 48: Caso 4. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia. ....	68

Figura 49: Caso 4. Corrientes en el inversor en redes de secuencia prolongando el tiempo de simulación ..... 69

Figura 50: Caso 4. Corrientes trifásicas de salida del inversor ..... 69

Figura 51: Corriente medida en la carga ..... 70

Figura 52: Caso 5. Corrientes en la carga en redes de secuencia ..... 71

Figura 53: Caso 5. Corrientes en el inversor empleando los reguladores diferentes ..... 72

Figura 54: Caso 5. Corrientes en el inversor empleando los mismos reguladores ..... 72

Figura 55: Caso 5. Corrientes trifásicas de salida del inversor ..... 73

Figura 56: Caso 6. Esquema de Matlab-Simulink para cargas variables ..... 73

Figura 57: Corriente medida en la carga ..... 74

Figura 58: Caso 6. Corriente en la carga en redes de secuencia ..... 74

Figura 59: Caso 6. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia ..... 75

Figura 60: Caso 6. Corrientes de salida del inversor sin filtrar ..... 75

Figura 61: Caso 6b. Esquema de Matlab-Simulink de la representación de las cargas ..... 76

Figura 62: Caso 6b. Corriente de salida de la carga ..... 76

Figura 63: Caso 6b. Evolución de la corriente en la carga en redes de secuencia ..... 77

Figura 64: Caso 6b. Evolución de la corriente de salida del inversor en redes de secuencia ..... 77

Figura 65: Caso 6b. Corrientes trifásicas de salida del inversor sin filtrar ..... 78

Figura 66: Esquema general de la parte 2 del estudio ..... 79

Figura 67: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en sus redes de secuencia 80

Figura 68: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de potencia..... 80

Figura 69: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de control ..... 81

Figura 70: Caso 1. Corriente medida en la carga ..... 82

Figura 71: Caso 1. Corriente medida en la carga en redes de secuencia ..... 82

Figura 72: Caso 1. Corriente de salida de la red..... 83

Figura 73: Caso 1. Corriente de salida del inversor..... 83

Figura 74: Caso 1. Corrientes en la red sin implementar las ecuaciones de desacoplo ..... 84

Figura 75: Caso 1. Tensión a la salida de los reguladores con ecuaciones de desacoplo (izquierda) y sin ellas (derecha) ..... 85

Figura 76: Caso 2. Medida de la corriente en la carga ..... 86

Figura 77: Caso 2. Corriente en la carga en redes de secuencia ..... 86

Figura 78: Caso 2. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia ..... 87

Figura 79: Caso 2. Corriente entregada por la red ..... 87

## Índice de figuras

Figura 80: Caso 2. Detalle de la corriente entregada por la red .....	88
Figura 81: Caso 2. Corriente entregada por la red sin ecuaciones de desacoplo .....	88
Figura 82: Caso 3. Corriente medida en la carga .....	89
Figura 83: Caso 3. Corriente en la carga en redes de secuencia .....	89
Figura 84: Caso 3. Corriente de salida del inversor en redes de secuencia .....	90
Figura 85: Caso 3. Corrientes trifásicas de salida del inversor sin filtrar .....	91
Figura 86: Caso 3. Corriente entregada por la red .....	91
Figura 87: Caso 4. Medida de la corriente en la carga .....	92
Figura 88: Caso 5. Corriente en la carga en redes de secuencia .....	92
Figura 89: Caso 4. Corriente de salida del inversor en redes de secuencia .....	93
Figura 90: Caso 4. Corrientes trifásicas de salida del inversor .....	93
Figura 91: Caso 4. Corriente de salida del inversor trifásicas sin ecuaciones de desacoplo .....	94
Figura 92: Caso 4. Corriente entregada por la red .....	94
Figura 93: Caso 5. Corrientes medidas en la carga .....	95
Figura 94: Caso 5. Corrientes en la carga expresadas en redes de secuencia .....	95
Figura 95: Caso 5. Corrientes entregadas por el inversor en redes de secuencia .....	96
Figura 96: Caso 6. Esquema de Matlab-Simulink para cargas variables .....	97
Figura 97: Caso 6. Medida de corrientes en la carga en redes de secuencia .....	97
Figura 98: Caso 6. Corrientes del inversor en redes de secuencia .....	98
Figura 99: Caso 6. Corriente entregada por el inversor .....	98
Figura 100: Caso 6. Corriente entregada por la red .....	98
Figura 101: Diagrama de Gantt de la planificación del Trabajo Fin de Grado .....	107



## Índice de tablas

Tabla 1: Combinación de interruptores y valores de la tensión de la salida para cada vector espacial.....	49
Tabla 2: Duración de cada una de las tareas en las que se ha dividido la realización del Trabajo Fin de Grado .....	105
Tabla 3: Tiempo de dedicación empleado para el cumplimiento de cada tarea .....	109
Tabla 4: Desglose del presupuesto total .....	110



## 1. Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo compensar los desequilibrios producidos en las líneas eléctricas debido a la conexión de cargas de distinto valor por cada una de sus fases. Este desequilibrio será compensado a través de un convertidor electrónico de potencia conectado en paralelo con la red.

En primer lugar, se hará una introducción a los sistemas trifásicos desequilibrados, cómo se puede cuantificar el desequilibrio existente, y las consecuencias negativas que tiene su existencia sobre los distintos elementos de los sistemas eléctricos. Además, se comentarán soluciones ya existentes para corregir dichos desequilibrios.

A continuación, se planteará el principio en el que se basará el sistema diseñado para corregir los desequilibrios: el teorema de Fortescue, que afirma que cualquier sistema trifásico desequilibrado puede descomponerse en tres sistemas trifásicos equilibrados, uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa, y un tercero de secuencia homopolar, aunque este tercero será nulo al encontrarse el neutro aislado.

Con la separación en los dos sistemas trifásicos equilibrados, y gracias a las transformaciones de Clarke y Park, podrán obtenerse cuatro señales, dos de ellas referidas a las componentes de secuencia directa y dos referidas a las componentes de secuencia inversa, que tendrán un valor continuo según una referencia giratoria.

A partir de estas transformaciones, se diseñarán dos estrategias de control para el inversor: en la primera de ellas, el objetivo será reducir el consumo de potencia de la red y que sea el inversor quien suministre la corriente necesaria a las cargas desequilibradas. En la segunda, el objetivo será que la red sí suministre potencia, pero solo de forma equilibrada, y que el equilibrado entre las fases sea realizado a través del inversor.

Se realizarán simulaciones con la herramienta *Simulink* de Matlab para cada una de estas dos opciones de control del convertidor. Se analizará la respuesta del sistema ante distintos niveles de carga, y ante la variación de éstas a lo largo de la propia simulación. Por último, se analizarán los resultados obtenidos para las corrientes suministradas tanto por el inversor como por la red.



## 2. Introducción y objetivos del Trabajo

Las líneas eléctricas sufren desequilibrios continuamente ya que es teóricamente imposible que, en todo momento, las cargas se encuentren igualmente distribuidas a lo largo de las tres fases. Dichos desequilibrios producirán, como se verá posteriormente, pérdidas en las líneas eléctricas, calentamientos y pérdidas de par y potencia en las máquinas eléctricas, y otras consecuencias negativas.

Los convertidores electrónicos de potencia son dispositivos utilizados en multitud de elementos de los sistemas eléctricos, como puede ser en los motores eléctricos para la regulación de la velocidad. A lo largo de los últimos años, se están produciendo grandes avances y mejoras tanto en la calidad de las señales generadas en la salida como en la potencia que los convertidores pueden transferir. Esto se debe a los avances que se están produciendo en la composición de los materiales que constituyen los semiconductores, de forma que son más resistentes a la temperatura; y también a los microprocesadores que gobiernan el control de los inversores, que cada vez son más potentes y son capaces de realizar mayor número de operaciones por unidad de tiempo.

El sistema diseñado a lo largo de este Trabajo Fin de Grado permitirá utilizar una tecnología ya desarrollada, los convertidores electrónicos de potencia, para solucionar el problema de los desequilibrios existentes en las líneas eléctricas debido a las cargas desequilibradas, evitando así las consecuencias negativas que esto supone.

Además, dada la gran versatilidad de los convertidores electrónicos de potencia, podrán conectarse en el lado de tensión continua una gran variedad de sistemas generadores, renovables por ejemplo, como un sistema de placas solares o de generación, lo que permitirá aprovechar una tecnología renovable en la eliminación de los desequilibrios.



### 3. Estado del arte

Un sistema eléctrico trifásico está constituido, idealmente, por tres corrientes alternas de igual frecuencia y amplitud que presentan un desfase de  $120^\circ$  eléctricos entre ellas, siguiendo siempre el mismo orden. Un sistema trifásico de tensiones será equilibrado cuando las corrientes cumplan la anterior condición.

Sin embargo, dicho equilibrio es técnicamente inalcanzable, ya que el continuo cambio de cargas conectadas a la red, o posibles fallos que puedan aparecer, provocan que las magnitudes eléctricas se encuentren en constante variación respecto de su valor teórico, por lo que en todo momento los sistemas sufrirán un mayor o menor desequilibrio.

#### 3.1 Sistemas trifásicos desequilibrados

Los sistemas desequilibrados pueden analizarse mediante la composición de tres sistemas trifásicos: dos ternas trifásicas simétricas equilibradas (cuyos fasores tienen igual magnitud desfasados  $120^\circ$  entre sí) y una tercera cuyas tres componentes son iguales en magnitud y fase, tal y como se puede observar en la Figura 1.

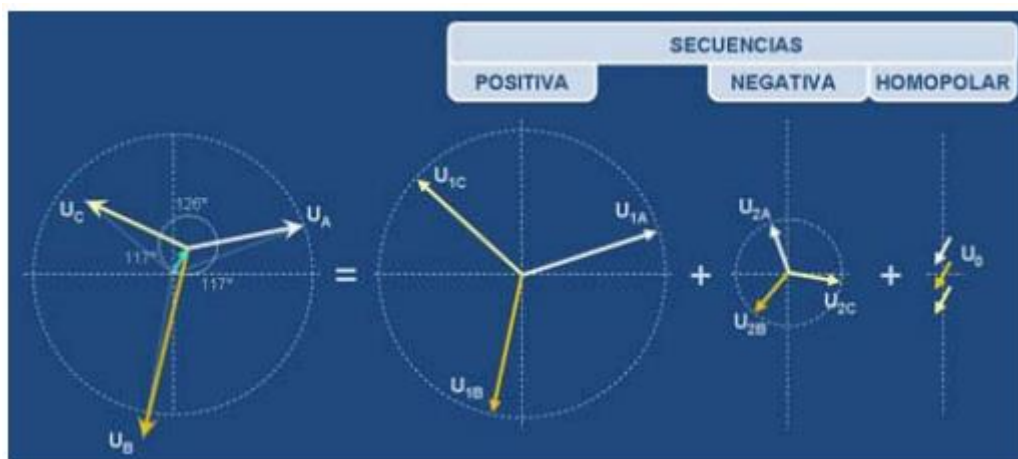


Figura 1: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado de tensiones en secuencia directa, inversa y homopolar

- La terna de secuencia directa está formada por tres fasores de igual magnitud, desfasados  $120^\circ$  entre ellos, con la misma secuencia de fase que las fases originales.
- La terna de secuencia inversa está compuesta por tres fasores iguales en magnitud (aunque no iguales que los fasores de secuencia directa), desplazados  $120^\circ$  entre sí, y con una secuencia de fases contraria a las fases originales.
- La presencia de la componente de secuencia homopolar está relacionada con la conexión a tierra. Solo existirán componentes de secuencia homopolar si existe un camino de retorno por el que pueda completarse el circuito. Las corrientes homopolares son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro, o por tierra, si existiera conexión galvánica con el circuito. Por tanto, si el circuito está conectado en estrella sin conexión del neutro a tierra o a otro punto neutro del circuito, la suma de las corrientes de las tres fases que llegan al neutro será cero, y no existirá componente homopolar.

La severidad del desequilibrio de tensión en un sistema trifásico puede ser expresada de diferentes formas:

- El cociente entre la componente de secuencia inversa y la componente de secuencia directa de la tensión (*Voltage Unbalance Factor*) [1];

$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100$$

Siendo  $V_2$  la componente de secuencia inversa, y  $V_1$  la componente de secuencia directa. La componente homopolar puede ser utilizada en vez de la componente inversa, lo que conduciría a  $\%VUF = \frac{V_0}{V_1} \cdot 100$ , siendo  $V_0$  la componente de secuencia homopolar. Sin embargo, la secuencia homopolar no está presente en todos los sistemas, como se ha mencionado previamente, por lo que esta segunda definición es menos utilizada.

- El cociente entre la máxima desviación respecto de la media de los valores de tensión, y la media entre las tres tensiones:

$$\% \text{Desequilibrio} = \frac{\text{Máxima desviación respecto de la media}}{\text{Media de las tensiones de línea}} \cdot 100$$



La principal causa de los desequilibrios de tensión son las cargas desequilibradas, y en consecuencia, las corrientes desequilibradas introducidas. Estos desequilibrios en las cargas pueden deberse a la distribución desigual de las cargas monofásicas en baja tensión. Puede ocurrir en zonas rurales alejadas, donde existen largas líneas eléctricas de transporte, pero también en los sistemas de distribución de las grandes ciudades, donde se producen fuertes demandas monofásicas, como por ejemplo las cargas debidas a la iluminación en los grandes espacios comerciales.

Otros sistemas que, a efectos de la red eléctrica, se comportan como grandes cargas monofásicas son los sistemas de tracción eléctrica y tracción ferroviaria o los hornos eléctricos.

Además, los desequilibrios también pueden ser introducidos en la red si las impedancias en los devanados de los transformadores son asimétricas, debido a bancos de transformadores en estrella abierta o triángulo abierto, impedancias asimétricas en las líneas de transporte, debido posiblemente a una trasposición de las fases incompleta a lo largo de la línea o fusibles fundidos en bancos de condensadores trifásicos.

Las instalaciones industriales y comerciales pueden tener un suministro equilibrado, y que sea dentro de la instalación donde se produzca el desequilibrio. Los desequilibrios pueden producirse tanto por una mala distribución de los equipamientos, como por una sobrecarga en alguna de las fases, o conexiones con una alta impedancia (por ejemplo, un mal contacto o un contacto flojo).

### 3.2 Efectos de los desequilibrios

Los desequilibrios de tensión tienen efectos adversos sobre el sistema eléctrico y los distintos equipos que se encuentren conectados, lo que se ve intensificado por el hecho de que un pequeño desequilibrio de tensión puede provocar grandísimos desequilibrios de corriente. Bajo situaciones equilibradas, se producirán menores pérdidas y efectos negativos debidos al calentamiento excesivo.

### 3.2.1 Efectos sobre las máquinas eléctricas

Los desequilibrios conducen a una generación de calor adicional en los devanados de las máquinas tanto síncronas como de inducción; esto disminuye la eficiencia y obliga a una reducción de la carga nominal de la máquina para que no sufran daños los aislamientos. El gráfico inferior de la Figura 2 muestra la relación entre el desequilibrio de tensión y el incremento de temperatura que provoca, que aumenta aproximadamente con el doble del cuadrado del porcentaje del desequilibrio de tensión.

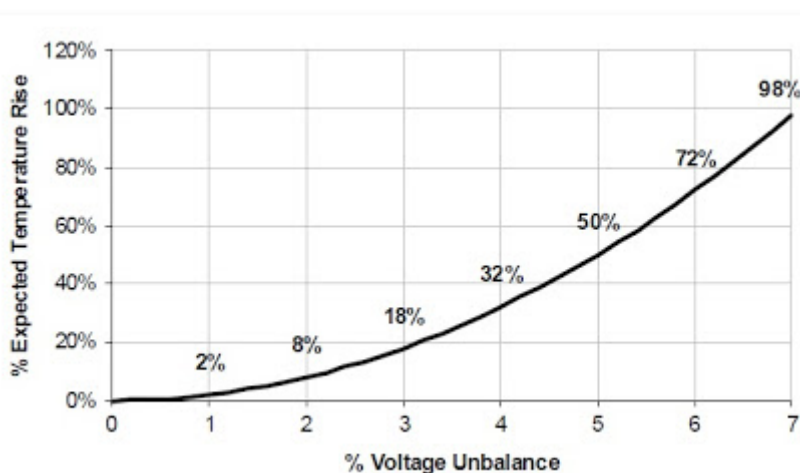


Figura 2: Aumento de la temperatura en las máquinas eléctricas en función del grado de desequilibrio

Como se ha mencionado anteriormente, los motores carecen habitualmente de secuencia homopolar, por lo que las tensiones en un motor tendrán únicamente componentes de secuencia directa e inversa, con secuencias de fase opuestas, 'abc' y 'acb' respectivamente. La componente de secuencia directa será la encargada de generar el par motor, mientras que la componente de secuencia inversa genera un flujo girando en sentido contrario al sentido de giro del rotor, lo que provocará un par no deseado y opuesto al par motor. El resultado es una disminución del par neto y de la velocidad, la posibilidad de pulsaciones en el par y en la velocidad, y un aumento de las vibraciones mecánicas. [2]

Además, la componente de secuencia inversa provoca grandes corrientes de secuencia inversa en la máquina, ya que su impedancia de secuencia inversa es muy pequeña, lo que aumenta aún más las pérdidas en la máquina y el aumento de temperatura. De manera general, el desequilibrio de tensiones provoca una disminución del rendimiento de la máquina y de su vida útil.

### 3.2.2 Efectos sobre accionamientos variadores de velocidad

Los convertidores electrónicos de potencia son utilizados como interfaz en gran variedad de cargas, como por ejemplo en su uso como variadores de velocidad conectados a motores eléctricos. La mayoría de estos dispositivos están compuestos por un puente rectificador de diodos, un condensador a la salida que reduce el rizado de la tensión continua, y a continuación un inversor que convierte la tensión continua de nuevo en tensión alterna, tal y como se observa en la Figura 3. La estrategia de control dada en cada momento al inversor controlará la amplitud y la frecuencia de la tensión de salida, y por tanto, la velocidad del motor. [3]

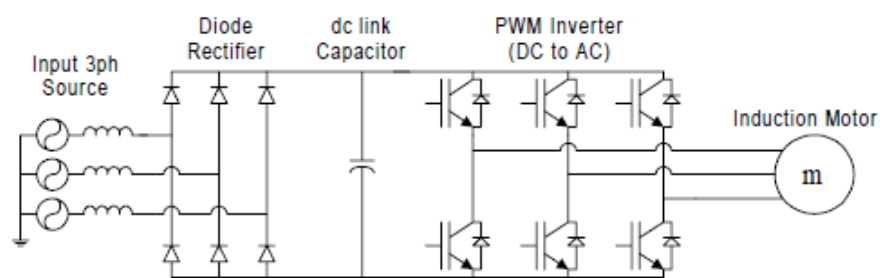


Figura 3: Estructura típica de un accionamiento variador de velocidad

Las corrientes de salida del inversor, en condiciones equilibradas, tienen un gran contenido en armónicos. En dicha situación, las características de los armónicos vienen determinadas por:

$$h = k \cdot q \pm 1$$

donde

- h= orden del armónico
- k=1, 2, 3, 4...
- q= número de pulsos del rectificador

Habitualmente, los variadores de velocidad como el de la figura, presentan un valor de q=6, ya que la tensión en el bus de continua está formada por trozos de senoide

de 60°, conteniendo seis pulsos en los 360°. Por tanto, las características de los armónicos de corriente serán de  $h=5$  (300 Hz),  $h=7$  (420 Hz),  $h=11$  y  $h=13$ , etc.

La Figura 4 es un ejemplo que muestra el porcentaje de dichos armónicos respecto del armónico fundamental, en una situación de 460 V de tensión de entrada y 80 kVA de potencia.

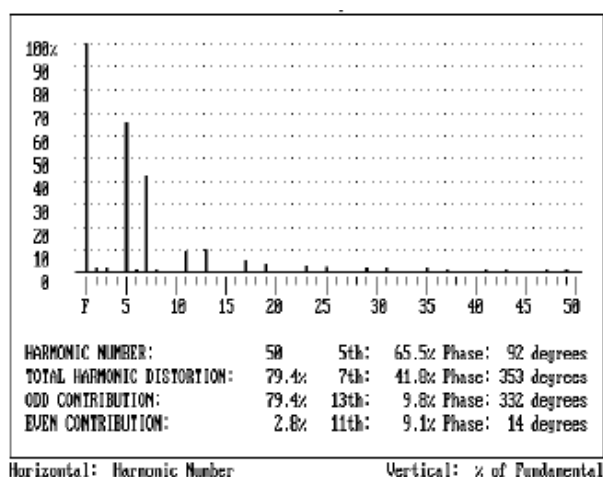


Figura 4: Espectro de los armónicos de corriente en una situación equilibrada

Sin embargo, bajo una situación desequilibrada, los armónicos de corriente ya no están restringidos a los armónicos característicos definidos previamente, sino que aparecen otros no deseados como el tercer o el noveno armónico. Como se observa en la Figura 5 inferior, cuanto mayor sea el nivel del desequilibrio (en la Figura de la izquierda es un 0.3%, mientras que en la Figura de la derecha es un 3.75%), más importante será la presencia de dichas componentes armónicas.

Este desequilibrio provoca una conducción asimétrica de los diodos, con lo que puede haber un exceso de corriente en alguna de las fases. Este exceso de corriente también puede provocar un excesivo calentamiento de los diodos y una reducción de la vida útil del condensador, o utilizar uno de mayor capacidad. El aumento tan significativo en el valor del tercer armónico puede provocar problemas de resonancia en el sistema, y la necesidad de utilizar filtros más grandes.

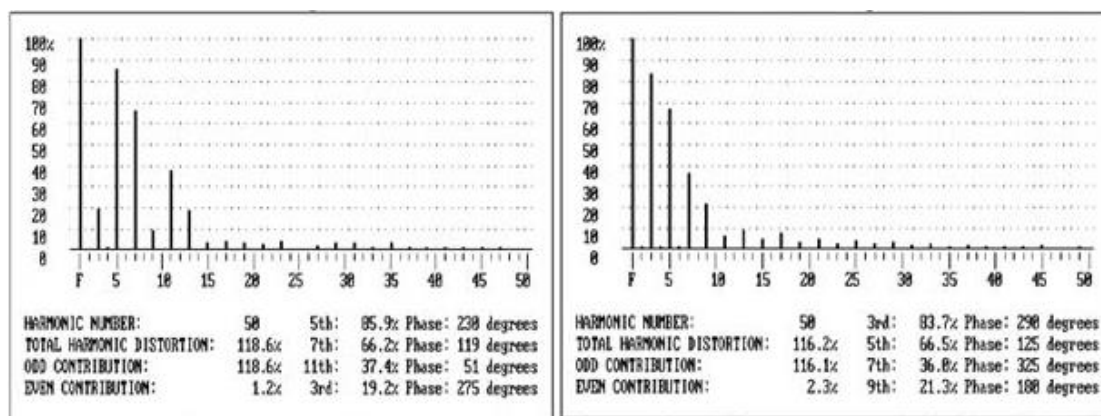


Figura 5: Espectro de los armónicos de corriente para un nivel de desequilibrio de (a) 0.3% y (b) 3.75%

### 3.3 Equilibrado de sistemas trifásicos desequilibrados

A pesar de que a continuación se mostrarán técnicas para mitigar los desequilibrios de tensión, mantener dicho equilibrio en cualquier punto de utilización es virtualmente imposible debido a las siguientes razones:

- Las cargas monofásicas se conectan y se desconectan continuamente de la red,
- Las cargas monofásicas no están distribuidas de forma equilibrada entre las tres fases,
- Las redes de distribución de potencia pueden ser inherentemente asimétricas.

Las cargas desequilibradas son la principal causa de los desequilibrios de tensión, por lo que una gran mejora puede ser conseguida tratando de distribuir cargas monofásicas de forma equilibrada a lo largo de las tres fases. Los sistemas de distribución eléctricos pueden ser equilibrados mediante interruptores automáticos y manuales que transfieren las cargas entre circuitos. Se han desarrollado diversos algoritmos para optimizar dichas posiciones de los interruptores utilizando estimaciones de las cargas a lo largo del tiempo para cada punto del análisis. Sin embargo, al ser un análisis discreto, no se puede equilibrar dinámicamente el sistema de cargas.

Otro tipo de técnica mitigadora es el uso de transformadores especiales, como los de Scott o de Steinmetz. Un transformador de Scott está compuesto por dos

transformadores monofásicos con relaciones de devanado especiales, que están conectados a un sistema trifásico. Se encuentran conectados de tal forma que a la salida se genera un sistema de tensiones ortogonal bifásico, que permite la conexión de dos sistemas monofásicos. Esta estructura es vista, a efectos de la red eléctrica, como una potencia equilibrada trifásica.

Un transformador Steinmetz es un transformador trifásico con una carga adicional para equilibrar la energía. Está constituido por un condensador y una inductancia con una carga nominal a la carga monofásica. Cuando el valor nominal de la potencia reactiva de la inductancia y del condensador igualan el valor nominal de la potencia reactiva de la carga, es visto por la red eléctrica como una carga trifásica equilibrada. La potencia nominal trifásica del transformador será igual a la potencia activa demandada por la carga monofásica.

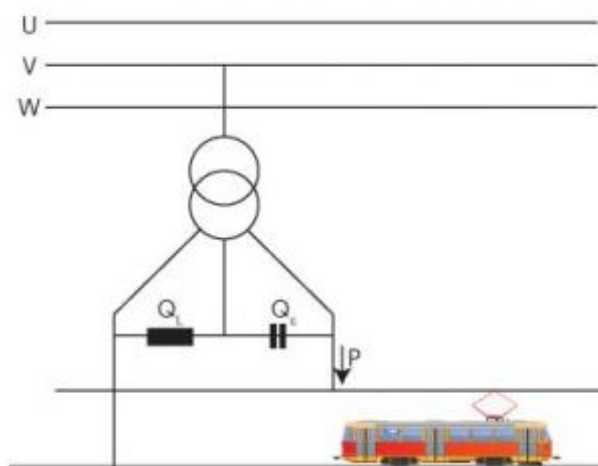


Figura 6: Carga monofásica conectada a una red trifásica, a través de un transformador de Steinmetz

En la Figura 6 se puede observar un esquema de esta instalación. Sin embargo, el equilibrado solo será perfecto cuando la potencia activa demandada por la carga sea constante e igual al valor de diseño del sistema.

Para reducir los desequilibrios, también pueden emplearse circuitos electrónicos de potencia de acción rápida, como los compensadores estáticos VAR. Estos dispositivos se comportan como si fueran impedancias complementarias que cambian de valor rápidamente, y compensan los cambios en los valores de las impedancias de cada fase. También son capaces de compensar la potencia reactiva no deseada. Sin embargo, son unos dispositivos caros, que sólo se utilizan para grandes cargas (hornos eléctricos, por ejemplo), o cuando otras soluciones son insuficientes.

## Compensación de desequilibrios mediante convertidores electrónicos de potencia

Otra medida correctora que puede utilizarse es el empleo de filtros activos de potencia, en paralelo con la carga, que además de reducir los armónicos de corriente, también se puede utilizar para compensar el factor de potencia de la carga.





## 4. Fundamento teórico

Para la identificación y el estudio de un sistema trifásico equilibrado es suficiente con obtener los valores de las magnitudes eléctricas de sólo una de sus fases, siendo válidos los resultados para las otras dos, ya que dichas magnitudes presentarán los mismos valores en módulo, y se encontrarán desfasadas  $120^\circ$  y  $240^\circ$ , respectivamente, respecto de la inicial.

Sin embargo, en sistemas desequilibrados, al tener cada una de las tres cargas un valor diferente, los parámetros eléctricos para cada una de las fases también serán diferentes, lo que conlleva a una resolución mucho más laboriosa, e impide la utilización de un equivalente fase-neutro.

En 1918, Charles L. Fortescue presentó ante el “American Institute of Electrical Engineers” un método para el estudio de los sistemas polifásicos desequilibrados, en el que proponía lo siguiente: “Un sistema de ‘n’ fasores desequilibrados puede ser descompuesto en ‘n-1’ sistemas equilibrados de secuencia diferente y de separación angular  $\frac{2\pi}{n}$ , más un sistema de fasores de igual magnitud y fase llamado secuencia cero.”

Aplicando este teorema a un sistema eléctrico trifásico desequilibrado, donde  $n=3$ , el teorema de Fortescue establece que podemos descomponer cualquier magnitud eléctrica desequilibrada en las llamadas secuencia directa, inversa y homopolar. La secuencia directa está formada por tres fasores de la misma amplitud, separados  $120^\circ$  entre sí, y con la misma secuencia de fases que el sistema original. La secuencia inversa está formada por tres fasores con la misma amplitud (en general, distinta a la amplitud de la secuencia directa), desfasados  $120^\circ$  pero con una secuencia de fases opuesta al sistema original. La secuencia homopolar está formada por tres fasores de igual amplitud y fase. [4]

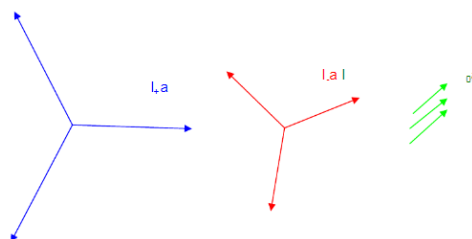


Figura 7: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos equilibrados

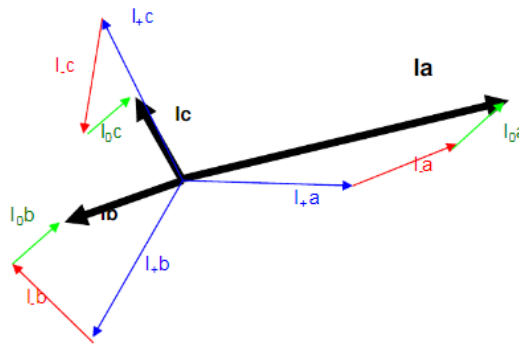


Figura 8: Suma de las tres componentes equilibradas para dar lugar a las componentes desequilibradas

Este teorema también se puede observar gráficamente a partir de las Figuras 7 y 8, donde se puede comprobar cómo la composición del sistema de secuencia directa (azul), secuencia inversa (rojo) y secuencia homopolar (verde), dan lugar al sistema trifásico desequilibrado de color negro.

De forma general, haciendo uso del operador complejo  $\vec{a} = \mathbf{1}_{120^\circ}$ , un sistema trifásico de tensiones se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \vec{V}_H \\ \vec{V}_D \\ \vec{V}_I \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \vec{a} & \vec{a}^2 \\ 1 & \vec{a}^2 & \vec{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \\ \vec{V}_C \end{pmatrix}$$

$$\vec{V}_H = \frac{1}{3} \cdot (\vec{V}_A + \vec{V}_B + \vec{V}_C) \tag{1}$$

$$\vec{V}_D = \frac{1}{3} \cdot (\vec{V}_A + \vec{a} \cdot \vec{V}_B + \vec{a}^2 \cdot \vec{V}_C) \tag{2}$$

$$\vec{V}_I = \frac{1}{3} \cdot (\vec{V}_A + \vec{a}^2 \cdot \vec{V}_B + \vec{a} \cdot \vec{V}_C) \tag{3}$$

Y el vector de tensiones se puede expresar como:

$$\vec{V}_G = (\vec{V}_A + \vec{a}\vec{V}_B + \vec{a}^2\vec{V}_C) \quad (4)$$

En aquellos sistemas que tengan el neutro aislado se cumplirá que  $I_A + I_B + I_C = 0$ , lo que dará lugar a  $V_A + V_B + V_C = 0$ . Por tanto, según la ecuación (1) no existirá la componente de secuencia homopolar.

También podemos expresar la ecuación (4) en función de sus componentes  $\alpha\beta$ , en una referencia estacionaria de dos ejes en cuadratura, mediante la transformación de Clarke:

$$\vec{V}_G = \vec{V}_\alpha + j\vec{V}_\beta = \frac{2}{3}\left(\vec{V}_A - \frac{1}{2}\vec{V}_B - \frac{1}{2}\vec{V}_C\right) + j\frac{\sqrt{3}}{3}(\vec{V}_B - \vec{V}_C) \quad (5)$$

Los vectores de tensión, al tratarse de ondas sinusoidales, pueden también expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \vec{V}_A &= V_A \cos(\omega t + \theta_A) = \text{Re}(V_A \cdot e^{j\theta_A} \cdot e^{j\omega t}) = \text{Re}(\vec{V}_A \cdot e^{j\omega t}) \\ &= \frac{1}{2}(\vec{V}_A \cdot e^{j\omega t} + \vec{V}_A^* \cdot e^{-j\omega t}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_B &= V_B \cos(\omega t + \theta_B) = \text{Re}(V_B \cdot e^{j\theta_B} \cdot e^{j\omega t}) = \text{Re}(\vec{V}_B \cdot e^{j\omega t}) \\ &= \frac{1}{2}(\vec{V}_B \cdot e^{j\omega t} + \vec{V}_B^* \cdot e^{-j\omega t}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_C &= V_C \cos(\omega t + \theta_C) = \text{Re}(V_C \cdot e^{j\theta_C} \cdot e^{j\omega t}) = \text{Re}(\vec{V}_C \cdot e^{j\omega t}) \\ &= \frac{1}{2}(\vec{V}_C \cdot e^{j\omega t} + \vec{V}_C^* \cdot e^{-j\omega t}) \end{aligned} \quad (8)$$

Introduciendo estas últimas expresiones en la ecuación (5) se tiene:

$$\begin{aligned}
\vec{V}_G &= \vec{V}_A - \frac{1}{2} \cdot \vec{V}_B - \frac{1}{2} \cdot \vec{V}_C + j \frac{\sqrt{3}}{2} (\vec{V}_B - \vec{V}_C) = \\
&= \left( \frac{1}{2} \cdot \vec{V}_A \cdot e^{j\omega t} + \frac{1}{2} \cdot \vec{V}_A^* \cdot e^{-j\omega t} \right) + \left( -\frac{1}{4} \cdot \vec{V}_B + j \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \vec{V}_B \right) \cdot e^{j\omega t} \\
&+ \left( -\frac{1}{4} \cdot \vec{V}_C - j \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \vec{V}_C \right) \cdot e^{j\omega t} + \left( -\frac{1}{4} \cdot \vec{V}_B^* + j \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \vec{V}_B^* \right) \cdot e^{-j\omega t} \quad (9) \\
&+ \left( -\frac{1}{4} \cdot \vec{V}_C^* - j \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \vec{V}_C^* \right) \cdot e^{-j\omega t}
\end{aligned}$$

Como se mencionó previamente,  $\vec{a} = 1_{120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$ , por lo que sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\vec{V}_G = \frac{1}{2} \cdot (\vec{V}_A + \vec{a} \cdot \vec{V}_B + \vec{a}^2 \cdot \vec{V}_C) \cdot e^{j\omega t} + \frac{1}{2} \cdot (\vec{V}_A^* + (\vec{a}^2)^* \cdot \vec{V}_B^* + \vec{a}^* \cdot \vec{V}_C^*) \cdot e^{-j\omega t} \quad (10)$$

Comparando ahora esta expresión con las ecuaciones (2) y (3), se obtiene que el vector de tensiones es igual a:

$$\boxed{\vec{V}_G = \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t}} \quad (11)$$

Existen diferentes métodos para obtener las componentes de secuencia directa e inversa a partir de un sistema desequilibrado de tensiones o corrientes. Para cualquiera de ellos, se considerará la frecuencia de la red  $f=50\text{Hz}$  y el ángulo de giro  $\theta$  sincronizado con la tensión de red, ya que ésta siempre se mantiene constante.

- Un método se basa en el empleo de filtros, habitualmente paso-bajo, aunque también se utilizan filtros paso-banda y banda eliminada.

Si se proyecta la ecuación (11) sobre un sistema de referencia ligado al vector de secuencia directa, es decir, a un sistema de referencia que gire a velocidad  $\omega$ , resulta

$$\vec{V}_G \cdot e^{-j\omega t} = \vec{V}_D + \vec{V}_I^* \cdot e^{-j2\omega t} = V_{dq}^+ + V_{dq}^- \quad (12)$$

que puede interpretarse como la suma de un valor constante (componentes  $dq$  de la secuencia directa), y una oscilación superpuesta de frecuencia el doble de la frecuencia fundamental (en nuestro caso, 100Hz). De forma análoga, proyectando sobre un sistema de referencia ligado al vector de secuencia inversa, es decir, un sistema de referencia que gire a  $-\omega$ , serán las componentes de secuencia directa las que se encuentren oscilando a 100Hz.

$$\vec{V}_G \cdot e^{j\omega t} = \vec{V}_D \cdot e^{j2\omega t} + \vec{V}_I^* = V_{dq}^+ + V_{dq}^- \quad (13)$$

En esto se basa la utilización de filtros para la separación de las secuencias directa e inversa. La componente de secuencia inversa, por ejemplo, también podría obtenerse restando al valor total el valor de la componente de secuencia directa, a la salida del filtro.

La Figura 9 muestra cómo serían los esquemas si se realizara la separación de las componentes de secuencia directa e inversa mediante este método. En la figura de la izquierda se emplea un filtro paso banda para eliminar la componente no deseada, y en la derecha se utiliza un filtro paso-bajo, aunque el resultado es el mismo si se sintonizan a la frecuencia adecuada los filtros.

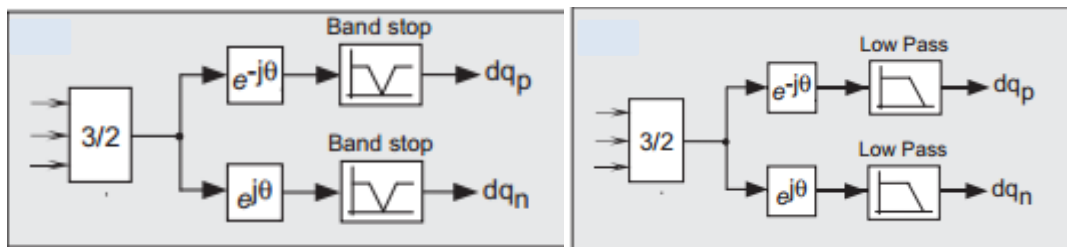


Figura 9: Esquemas para la extracción de las componentes de secuencia directa e inversa mediante el uso de filtros

Para lograr un buen filtrado de la componente de 100 Hz es necesario utilizar una frecuencia de corte muy baja. Cuanto menor sea dicha frecuencia, más lenta será la respuesta del sistema en el transitorio, o ante variaciones en la señal de entrada, y viceversa; cuanto mayor sea la frecuencia de corte, más rápida será la respuesta, pero será de peor calidad la señal de salida. [5]

- Otro método, efectivo tanto en régimen transitorio como en régimen permanente, es el DSC (*Delayed Signal Cancellation*) [6]. Consiste en desplazar

las componentes  $\alpha\beta$  del vector un cuarto del período fundamental y restarlas en cuadratura para obtener la secuencia inversa, como se observa en la siguiente ecuación.

$$\bar{V}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \left( \bar{V}_{\alpha\beta}(t) - j\bar{V}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (14)$$

en la que T, al tratarse de señales de  $f=50\text{Hz}$ , será  $T=20\text{ms}$  y atrasaremos la señal 5ms. Para obtener la secuencia directa, basta con restar  $\bar{V}_{\alpha\beta}^-$  de la tensión total, lo que da lugar a

$$\bar{V}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \left( \bar{V}_{\alpha\beta}(t) + j\bar{V}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (15)$$

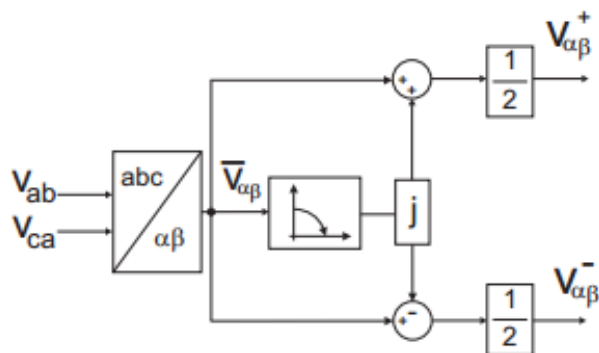


Figura 10: Esquema del método DSC para la extracción de las componentes de secuencia directa e inversa

El diagrama de bloques del algoritmo se muestra en la Figura 10, donde se ayuda del fasor complejo  $j$  para sumar o restar la componente original y la retrasada en cuadratura.

Se puede demostrar fácilmente cómo la suma de las componentes  $\bar{V}_{\alpha\beta}^+$  y  $\bar{V}_{\alpha\beta}^-$  equivale, efectivamente, al vector tensión inicial.

Podemos expresar el vector de tensiones  $\vec{V}_G$  en ejes fijos como

$$\vec{V}_G = \vec{V}_{\alpha\beta} = \vec{V}_{\alpha\beta}^+ + \vec{V}_{\alpha\beta}^- = \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \quad (16)$$

Partiendo ahora de la ecuación para  $\vec{V}_{\alpha\beta}^+$  obtenida en (15) y teniendo en cuenta la expresión anterior:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{\alpha\beta}^+ &= \frac{1}{2} \left( \vec{V}_{\alpha\beta}(t) + j\vec{V}_{\alpha\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \right) + \\ &\quad + j \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t - j\frac{\pi}{2}} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t + j\frac{\pi}{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} - \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \right) = \\ &= \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (17)$$

Análogamente, para  $\vec{V}_{\alpha\beta}^-$ , a partir de la ecuación (14), y operando de la misma forma:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{\alpha\beta}^- &= \frac{1}{2} \left( \vec{V}_{\alpha\beta}(t) - j\vec{V}_{\alpha\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \right) - \\ &\quad - j \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t - j\frac{\pi}{2}} - \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t + j\frac{\pi}{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} - \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \right) = \\ &= \frac{3}{2} \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} \end{aligned} \quad (18)$$

Por tanto, se comprueba que

$$\vec{V}_{\alpha\beta}^+ + \vec{V}_{\alpha\beta}^- = \frac{3}{2} \vec{V}_D \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \vec{V}_I^* \cdot e^{-j\omega t} = \vec{V}_G \quad (19)$$

Las ecuaciones empleadas en el método de DSC son por tanto, válidas. Éste será el método que posteriormente se empleará en la simulación para la separación de las componentes  $\alpha\beta$  en sus respectivas componentes de secuencia directa y secuencia inversa.

En la simulación posterior, se partirá de la medida de las tres corrientes en la carga:  $I_r$ ,  $I_s$  e  $I_t$ . De forma general, al tratarse de un sistema de cargas desequilibradas, y por tanto, de corrientes desequilibradas, los valores por cada una de las tres fases serán diferentes. En primer lugar, se obtienen las componentes en la referencia estacionaria  $\alpha\beta$  de dichas corrientes con la transformada de Clarke, con las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$\vec{I}_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left( \vec{I}_r(t) - \frac{1}{2} \vec{I}_s(t) - \frac{1}{2} \vec{I}_t(t) \right) \quad (20)$$

$$\vec{I}_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \left( \vec{I}_s(t) - \vec{I}_t(t) \right) \quad (21)$$

Esta transformación da lugar a dos componentes sinusoidales, desfasadas  $90^\circ$  entre sí. La componente  $\beta$  adelantará  $90^\circ$  a la componente  $\alpha$ , ya que la secuencia de fases establecida por la red es de secuencia directa.

A partir de estas componentes, se calculan las componentes  $\alpha\beta$  de secuencia directa e inversa, según el método DSC explicado anteriormente.

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \left( \bar{I}_{\alpha\beta}(t) + j \bar{I}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (22)$$

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \left( \bar{I}_{\alpha\beta}(t) - j \bar{I}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (23)$$

Al tratarse de una señal de 50Hz, el tiempo de retardo serán 5ms. Ahora tendremos dos parejas de señales sinusoidales desfasadas  $90^\circ$ : una pareja correspondiente a las componentes  $\alpha\beta$  de secuencia directa, donde la componente  $\beta$



adelantará a la componente  $\alpha$ ; y una segunda pareja referida a las componentes  $\alpha\beta$  de secuencia inversa, en las que en este caso la componente  $\alpha$  será quien esté  $90^\circ$  adelantada.

A continuación, ya se pueden obtener las componentes dq en ejes giratorios para secuencia directa y para secuencia inversa, mediante el uso de la transformada de Park. El ángulo  $\theta$  hace referencia al ángulo de la red.

$$\vec{I}_d^+ = \vec{I}_\alpha^+(t) \cdot \cos(\theta) + \vec{I}_\beta^+(t) \cdot \sin(\theta) \quad (24)$$

$$\vec{I}_q^+ = -\vec{I}_\alpha^+(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{I}_\beta^+(t) \cdot \cos(\theta) \quad (25)$$

$$\vec{I}_d^- = \vec{I}_\alpha^-(t) \cdot \cos(\theta) - \vec{I}_\beta^-(t) \cdot \sin(\theta) \quad (26)$$

$$\vec{I}_q^- = \vec{I}_\alpha^-(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{I}_\beta^-(t) \cdot \cos(\theta) \quad (27)$$

De esta forma, se obtienen 4 componentes que ya no serán sinusoidales, sino continuas, y son las que serán utilizadas posteriormente como valores de referencia para la obtención de las corrientes de salida del inversor.



## 5. Descripción del modelo

Para el estudio realizado se ha partido del siguiente esquema general del circuito de potencia:

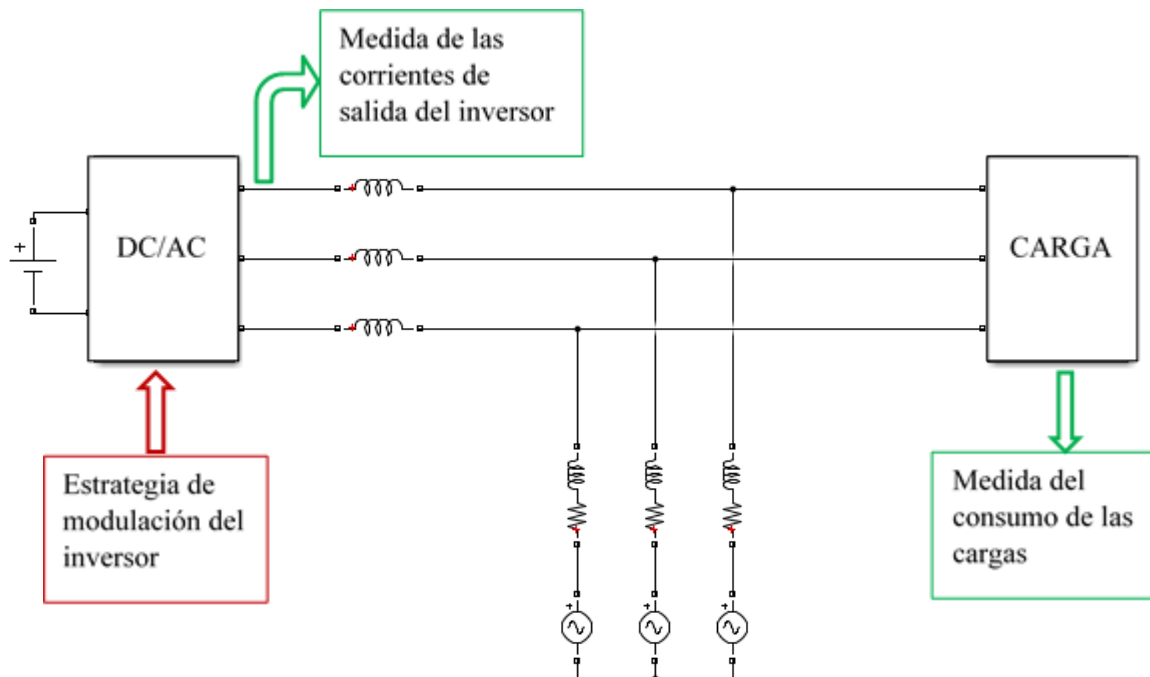


Figura 11: Esquema general del circuito de potencia

Dentro del esquema de potencia se encuentra por un lado, la red, que será una de las fuentes de potencia. Actúa como un sistema generador de tensiones de 400V de tensión de línea, a una frecuencia de 50 Hz. La impedancia de la línea eléctrica se ha simulado como una asociación en serie de una resistencia de  $R=1 \Omega$  y una inductancia de  $L=3 \text{ mH}$  por fase.

En paralelo con la red, se encuentra el segundo sistema de generación que puede ser, por ejemplo, un sistema de generadores eólicos o de paneles solares fotovoltaicos y que ha sido representado por una fuente de tensión continua de 700 V, que se encuentra conectada a un inversor DC/AC trifásico. Actuando sobre el sistema de control de dicho inversor, se conseguirá a la salida del inversor un sistema trifásico de corrientes que, tras ser filtradas con una inductancia de  $L=3\text{mH}$ , alimentan a la carga.

A partir de este esquema básico, se van a analizar dos situaciones diferentes:

1. El sistema de generación, que a través del inversor se encuentra conectado a la red, será quien suministre toda la corriente que necesita la carga, por lo que tendrá que encargarse además del equilibrado de las tres fases.
2. La red suministrará potencia de forma equilibrada a la carga, y será el convertidor el encargado únicamente del equilibrado entre las distintas fases, por lo que en este caso solo será necesario una fuente de potencia (la red).

Tanto la red como la fuente de tensión continua junto con el inversor se encuentran conectadas a un conjunto de cargas, que de forma general serán desequilibradas, por lo que el consumo de potencia por cada una de las tres fases será diferente. La medida del consumo en cada una de las tres fases será el punto de partida para el diseño del sistema de control del inversor.

Antes del diseño en sí del esquema de control, fue necesario plantearse qué objetivo se perseguía con éste. La existencia de unas cargas desequilibradas demandando potencia equivale a un consumo desequilibrado de corriente por cada una de las tres fases, ya que la red impone el valor de la tensión constante. Si en un primer lugar el inversor no estuviera conectado, sería la red quien tendría que asumir estos desequilibrios, con las desventajas que ello supone: pérdidas adicionales de potencia a lo largo de la línea y también en otros equipos que pudieran estar conectados a ésta.

Por tanto, el objetivo principal que se busca es reducir el consumo de potencia de la red, y que sea el inversor quien aporte la potencia necesaria a cada una de las fases de la carga, aunque las corrientes inyectadas en cada una de las fases tengan que ser diferentes para cubrir la demanda requerida.

Para conseguir esto, se ha diseñado el siguiente esquema de control:

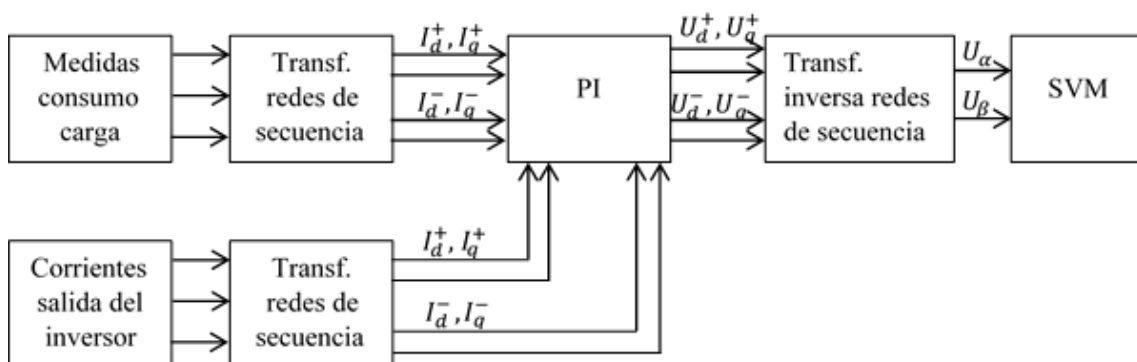


Figura 12: Esquema general del sistema de control

En primer lugar, es necesario conocer el consumo de la carga, es decir, cuánta corriente está demandando cada una de las tres fases en cada instante de tiempo. Los resultados inicialmente medidos son tres ondas sinusoidales que, al tratarse de cargas de valores diferentes, tendrán distinta amplitud. Trabajar con señales sinusoidales no es útil ni práctico para el control, ya que los valores instantáneos varían continuamente con el tiempo, por lo que es necesario realizar algún tipo de transformación para convertir estas tres señales en otras que sí sean útiles para la posterior estrategia de control.

La opción elegida ha sido convertir las tres ondas trifásicas en dos componentes continuas, mediante las transformaciones de Clarke y Park. De esta forma, las tres ondas trifásicas se convierten en dos componentes de valor constante respecto de dos ejes d-q en cuadratura, que forman una referencia giratoria a la velocidad  $\omega$  de la red. La posterior regulación es así más sencilla, ya que solo será necesario comparar valores de señales continuas e invariables en el tiempo.

Esto sólo es aplicable cuando se parte de un sistema trifásico equilibrado de corrientes, algo que no ocurrirá en este caso. Sin embargo, gracias al teorema de Fortescue, se puede descomponer cualquier sistema trifásico desequilibrado en dos sistemas trifásicos equilibrados, cada uno de ellos de secuencia distinta, por lo que partiendo de las tres corrientes desequilibradas medidas en la carga, podrán obtenerse dos sistemas trifásicos equilibrados de corrientes, uno de ellos de secuencia directa, al igual que el original medido, y el otro de secuencia inversa.

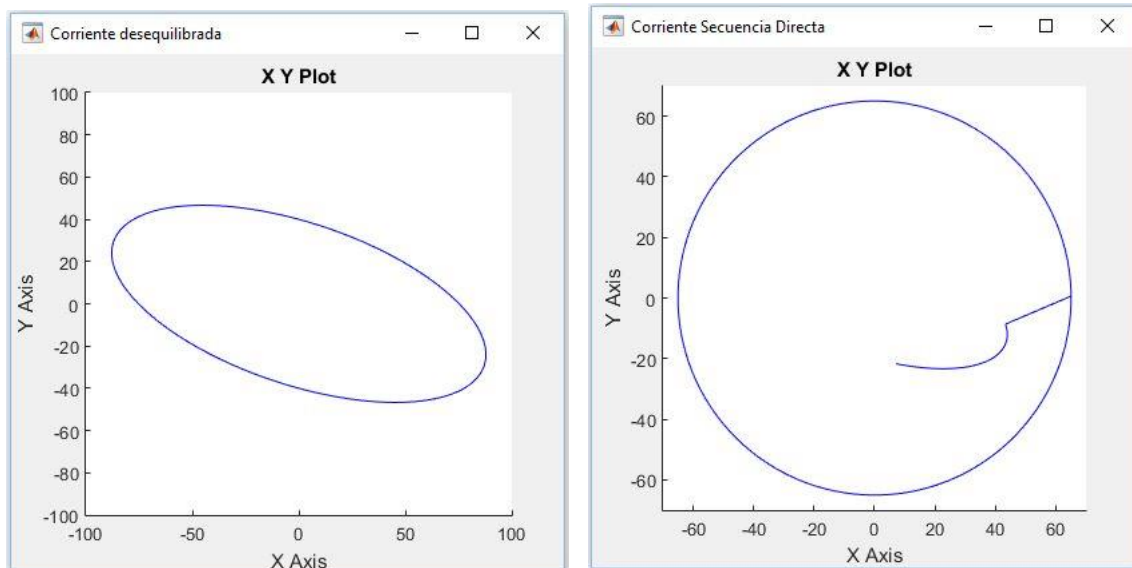


Figura 13: Diagrama XY de un sistema trifásico desequilibrado (izquierda) y de un sistema trifásico equilibrado (derecha)

## Descripción del modelo

En la Figura anterior se puede observar la diferencia entre un sistema trifásico desequilibrado y uno equilibrado. La imagen de la izquierda muestra la representación del vector corriente en un caso de carga desequilibrada. Como se puede observar, no tiene la misma magnitud a lo largo de su evolución temporal. Sin embargo, en la figura de la derecha se puede observar cómo, en un sistema trifásico equilibrado, el vector corriente sí dibuja una circunferencia.

Para implementar esta separación, se recurre al método DSC (*Delayed Signal Cancellation*) [6], del que ya ha sido demostrada previamente su validez. Para poder aplicar sus ecuaciones, es necesario realizar en primer lugar la transformación de Clarke, en la que se pasa de las tres componentes directamente medidas en la carga, a dos componentes sinusoidales, separadas 90° entre sí, en una referencia  $\alpha$ - $\beta$  estacionaria cuyos ejes se encuentran a 90°.

Una vez obtenidas, se implementan las ecuaciones (28) y (29) para realizar la separación en las dos redes de secuencia, por lo que se obtendrán dos parejas de ondas sinusoidales en la referencia estacionaria  $\alpha$ - $\beta$ , la primera de ellas referida a las componentes de secuencia directa y la segunda a las componentes de secuencia inversa.

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \left( \bar{I}_{\alpha\beta}(t) + j\bar{I}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (28)$$

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \left( \bar{I}_{\alpha\beta}(t) - j\bar{I}_{\alpha\beta}(t - \frac{T}{4}) \right) \quad (29)$$

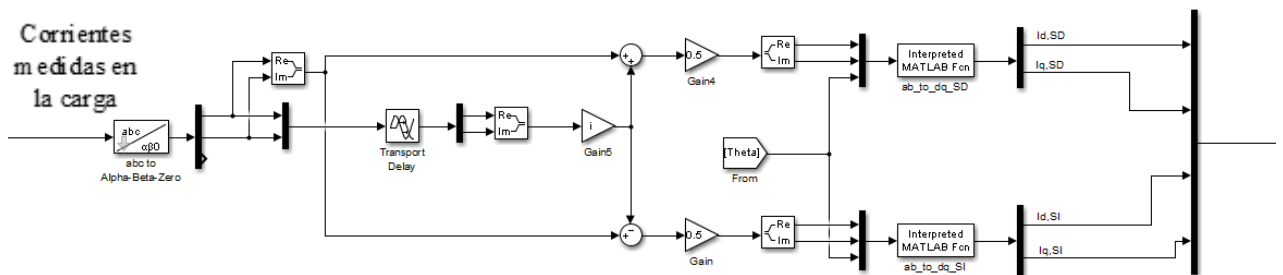


Figura 14: Esquema de Matlab-Simulink de separación en redes de secuencia

El esquema de la Figura 14 muestra la implantación de dichas ecuaciones en el entorno de Matlab-Simulink. Por comodidad, para realizar las transformaciones se trabajó con fasores en el plano complejo, en el que la parte real estaba asociada a la componente  $\alpha$  y la parte imaginaria a la componente  $\beta$ . En primer lugar, tras la transformación de las corrientes medidas en las componentes  $\alpha$  y  $\beta$  de la referencia estacionaria, es necesario retrasar estas señales un cuarto de período. Al tratarse de señales de 50 Hz, este retraso serán 5ms, que será el parámetro del bloque “Transport Delay”. Una vez realizado el desplazamiento, se convierten las dos nuevas señales en un fasor complejo y, sumando o restando en cuadratura las componentes retrasadas respecto de las originales, y dividiendo dicho valor por 2, se obtendrá el fasor complejo referido a las componentes de secuencia directa e inversa, respectivamente. Para obtener las componentes  $\alpha$  y  $\beta$  de ambas secuencias, simplemente habrá que descomponer el fasor en su parte real e imaginaria.

Tras realizar esta transformación, el sistema trifásico desequilibrado original ya está separado en dos sistemas equilibrados e independientes, definidos cada uno por sus componentes  $\alpha$  y  $\beta$ :  $\vec{I}_\alpha^+$  e  $\vec{I}_\beta^+$  para las componentes de secuencia directa, y  $\vec{I}_\alpha^-$  e  $\vec{I}_\beta^-$  para las de secuencia inversa. A continuación, siendo  $\theta$  el ángulo de red calculado previamente, se realiza la transformación de Park para obtener las cuatro componentes en la referencia d-q giratoria, según las ecuaciones (30), (31), (32) y (33). Es necesario tener en cuenta que, mientras que la red y las componentes de secuencia directa giran en el mismo sentido, las componentes de secuencia inversa lo harán en sentido contrario, por lo que habrá que considerarlo a la hora de realizar estas transformaciones.

$$\vec{I}_d^+ = \vec{I}_\alpha^+(t) \cdot \cos(\theta) + \vec{I}_\beta^+(t) \cdot \sin(\theta) \quad (30)$$

$$\vec{I}_q^+ = -\vec{I}_\alpha^+(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{I}_\beta^+(t) \cdot \cos(\theta) \quad (31)$$

$$\vec{I}_d^- = \vec{I}_\alpha^-(t) \cdot \cos(\theta) - \vec{I}_\beta^-(t) \cdot \sin(\theta) \quad (32)$$

$$\vec{I}_q^- = \vec{I}_\alpha^-(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{I}_\beta^-(t) \cdot \cos(\theta) \quad (33)$$

Tras las transformaciones de Park, tendremos cuatro componentes continuas:  $\vec{I}_d^+$  e  $\vec{I}_q^+$  serán las componentes de secuencia directa en ejes d y q respectivamente, mientras que  $\vec{I}_d^-$  e  $\vec{I}_q^-$  estarán asociadas a las componentes de secuencia inversa.

Como se mencionaba anteriormente, el objetivo para el que se diseñará el control es reducir el consumo de la red, y que sea el inversor quien suministre la potencia necesaria a las cargas. Por tanto, se utilizarán los valores en componentes d-q obtenidos a partir de las medidas de las corrientes en la carga como referencia a seguir por las corrientes de salida del inversor. De esta forma, las corrientes inyectadas por la red serán prácticamente nulas, ya que toda la potencia será aportada por el inversor.

Para ello, es necesario que las corrientes medidas a la salida del inversor estén expresadas de la misma forma que las corrientes medidas en la carga, es decir, en las componentes d-q de secuencia directa y de secuencia inversa. El proceso a realizar será análogo al descrito para la transformación de las corrientes en la carga.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la forma de onda de las corrientes de salida del inversor presenta una gran cantidad de armónicos de alta frecuencia, por lo que la onda estará muy distorsionada. Con el fin de mitigar parcialmente esta distorsión, se colocan, antes de la entrada a la transformación en redes de frecuencia, un filtro paso-bajo. Para lograr un equilibrio entre la reducción de la componente armónica y un desfase demasiado grande respecto de la onda original, tras probar diferentes valores, se decide que la frecuencia de corte del filtro paso-bajo sea de 1000 Hz.

Tras filtrar las corrientes de salida del inversor, se realiza el mismo proceso que el descrito para las corrientes en la carga, se obtienen nuevamente cuatro valores continuos, que corresponderán a  $\vec{I}_d^+$  e  $\vec{I}_q^+$  para la red de secuencia directa, y las componentes de secuencia inversa serán  $\vec{I}_d^-$  e  $\vec{I}_q^-$ .

Una vez que las corrientes tanto en la carga como a la salida del inversor se encuentran expresadas en la misma referencia, ya es posible comparar sus valores de cara a la posterior estrategia de modulación del inversor. Existen diferentes técnicas para realizar esta operación:

- Control por banda de histéresis

El control de intensidad mediante la implementación de una banda de histéresis se basa en comparar la señal de la corriente de referencia, con la señal medida a la salida del inversor. Si el error entre la referencia y el valor medido supera un cierto umbral  $\pm h$ , llamado ancho de banda, la rama del inversor correspondiente a esa fase cambiará su estado de conmutación de forma que, alterando la polaridad de la tensión aplicada cambie la trayectoria de la corriente y así ésta se



mantenga dentro de la banda de histéresis. El esquema de control se indica en la Figura 15.

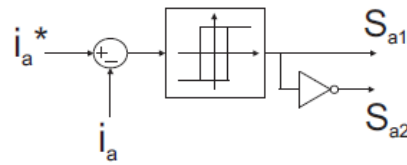


Figura 15: Esquema de control por banda de histéresis

Este método de control presenta como ventajas un esquema de control relativamente simple en comparación con otros, y una gran robustez, donde se consigue un seguimiento de la señal de referencia a pesar de que haya variaciones en la carga. Como principales inconvenientes, se tiene que el rizado en la corriente depende tanto de la banda de histéresis como de la frecuencia de trabajo. Cuanto mayor sea esta frecuencia y menos la banda de histéresis, más sinusoidales serán las ondas de corriente obtenidas. Sin embargo, si la frecuencia de conmutación es demasiado elevada, las pérdidas por conmutación serán muy grandes y podrían dañarse los semiconductores de potencia. [7]

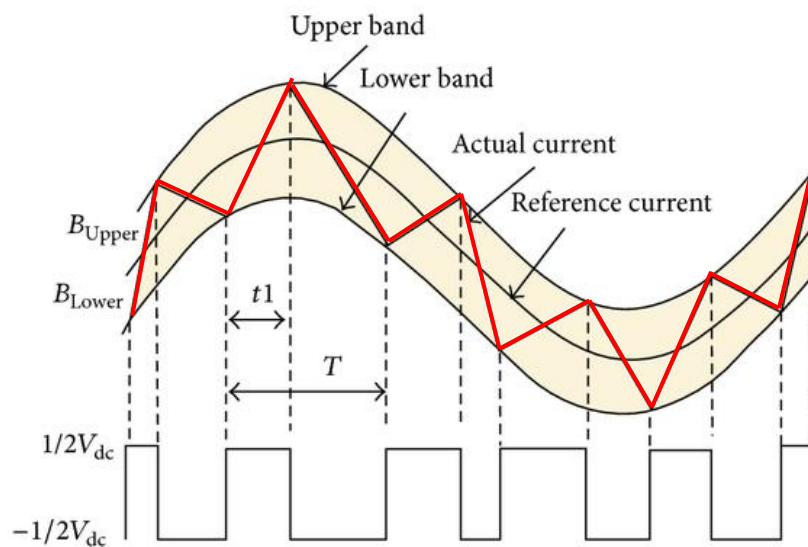


Figura 16: Forma de la onda de corriente de salida en control con banda de histéresis

La Figura 16 muestra la forma de onda de la corriente resultante (en color rojo), a la salida del inversor tras la estrategia de control por banda de histéresis. Se

observa cómo, cuando la onda de corriente alcanza uno de los dos límites de la banda, la polaridad de la tensión continua de entrada cambia, lo que provoca también un cambio en la onda de corriente.

- Modulación PWM sinusoidal

La modulación por ancho de pulsos sinusoidal o PWM consiste en generar pulsos de ancho proporcional a la amplitud de una señal de referencia o moduladora. Esta señal de referencia es comparada con una señal portadora de forma triangular, tal como se observa en la Figura 17:

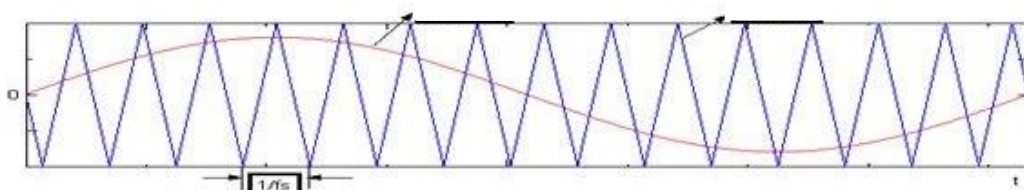


Figura 17: Comparación de señal moduladora y portadora en modulación sinusoidal PWM

Los puntos de intersección entre ambas señales marcan los momentos en los que ocurren los flancos de subida y de bajada de los pulsos de anchura variable: cuando el valor de la señal moduladora sea mayor que el de la portadora, se producirá un flanco de subida y viceversa, cuando el valor de la señal moduladora sea menor que el de la señal portadora, se producirá un flanco de bajada en los pulsos del inversor.

De esta forma, la señal pulsante de salida contiene implícitamente toda la información sobre la onda moduladora (amplitud y frecuencia). La señal obtenida a la salida del inversor no será una señal sinusoidal, sino una señal cuadrada y pulsante, pero en la que su armónico fundamental se corresponde con la señal de referencia.

- Modulación vectorial (SVPWM)

En este caso se realiza un control vectorial. El vector tensión de referencia, está expresado en un sistema de referencia giratorio que gira con la velocidad  $\omega$  de la red. Al ser el método finalmente implementado, se explicará a continuación en detalle.

Tanto las corrientes de referencia como las corrientes medidas a la salida del inversor se encuentran expresadas en una misma referencia (d-q giratoria en sentido  $\omega$  para las componentes de secuencia directa, y en sentido  $-\omega$  para las componentes de secuencia inversa). El siguiente paso será implementar tres reguladores PI que actúan sobre el error, es decir, la diferencia entre el valor deseado (la corriente medida en la carga) y el valor real (la corriente de salida del inversor). Los reguladores PI tienen como respuesta a la señal de error los valores de referencia de la tensión para el inversor.

Los reguladores PI presentan la siguiente estructura:  $R(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ , donde  $K_p$  representa la parte proporcional y  $\frac{K_i}{s}$  la parte integradora. Se han fijado distintos valores a las constantes para las componentes de secuencia directa y para las de secuencia inversa ya que ha observado experimentalmente que, a pesar de los desequilibrios, el nivel de carga de las componentes de secuencia inversa no es tan grande como el de las de secuencia directa. Los valores de dichas constantes se han ajustado de forma experimental, y finalmente se han tomado los siguientes valores:

- En las componentes de secuencia directa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 50$
  
- En las componentes de secuencia inversa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 20$

Gracias la parte integral del regulador PI, se puede lograr anular el error de posición cuando se trabaja con magnitudes continuas. Si se trabajara con las componentes alternas, no se conseguiría anular dicho error por completo. Teóricamente, la ganancia proporcional ( $K_p$ ), es directamente proporcional a la amplitud del rizado de la corriente. En la Figura 18 está representado dicho esquema. A la salida de cada regulador PI, se encuentra un saturador, que limita la tensión de salida entre -500 y 500 V. Este valor de tensión es necesario para que posteriormente no se sature el inversor.

## Descripción del modelo

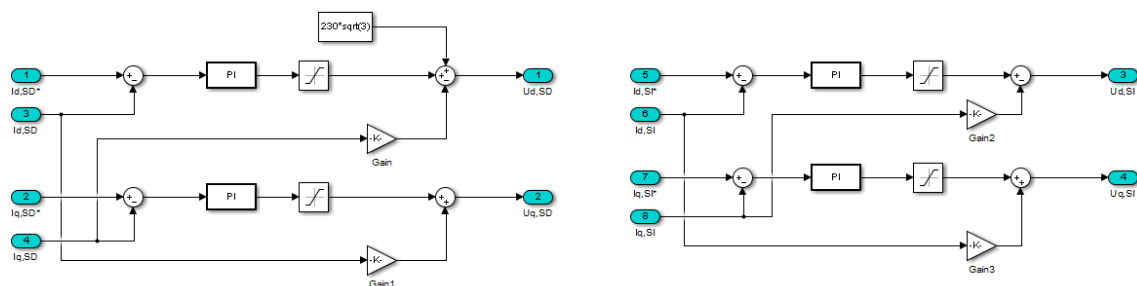


Figura 18: Reguladores PI para la obtención de las tensiones de referencia

En el esquema anterior se puede observar como cada una de las cuatro componentes de tensión no depende únicamente de la integración del error de la misma componente de la corriente, si no que están relacionadas entre sí. Es decir, el valor de  $U_d$  dependerá del valor tanto de  $I_d$  como de  $I_q$  y lo mismo ocurrirá con la otra componente.  $U_q$  dependerá tanto de  $I_d$  como de  $I_q$ . Esto ocurre en las componentes de secuencia directa y también en las componentes de secuencia inversa, y se debe al acoplamiento que existe entre las componentes d y q de la corriente.

Para eliminar el acoplamiento que existe y que cada componente de tensión solo dependa de su respectiva corriente, se introducen a la salida de los reguladores las siguientes ecuaciones (34), (35), (36) y (37), donde  $\omega$  representa la velocidad de giro del sistema de referencia móvil, que al tratarse originalmente de señales de 50 Hz, será igual a  $100\pi$ ; y  $L$  es el valor de la inductancia a la salida del inversor, que en este caso tiene un valor de 3mH.

$$U_{d,SD} = U_{d,SD}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SD} + U_{red} \quad (34)$$

$$U_{q,SD} = U_{q,SD}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SD} \quad (35)$$

$$U_{d,SI} = U_{d,SI}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SI} \quad (36)$$

$$U_{q,SI} = U_{q,SI}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SI} \quad (37)$$

En cada una de las cuatro ecuaciones anteriores, el valor  $U^*$  hace referencia al valor de la tensión tras la salida del regulador PI, que luego es corregido para eliminar el efecto de la componente cruzada. Únicamente en la componente  $U_{d,SD}$  se suma el valor de la tensión de red, ya que la red es un sistema trifásico

de tensiones en secuencia directa, y al ser el ángulo  $\theta$  el ángulo de red,  $U_{d,red}$  será la única componente distinta de cero, e igual a su módulo.

La implementación de estas ecuaciones de desacoplo en el modelo consigue que, manteniendo constantes los valores en los reguladores, la respuesta del sistema sea mucho más rápida, y se alcance antes el valor en régimen permanente. Sin embargo, una vez que dicho régimen permanente se ha alcanzado, las oscilaciones en torno a ese valor son mayores que sin la presencia de dichas ecuaciones. Esto se debe a que el término  $\omega \cdot L \cdot I$  introduce una continuamente una pequeña perturbación en el valor final.

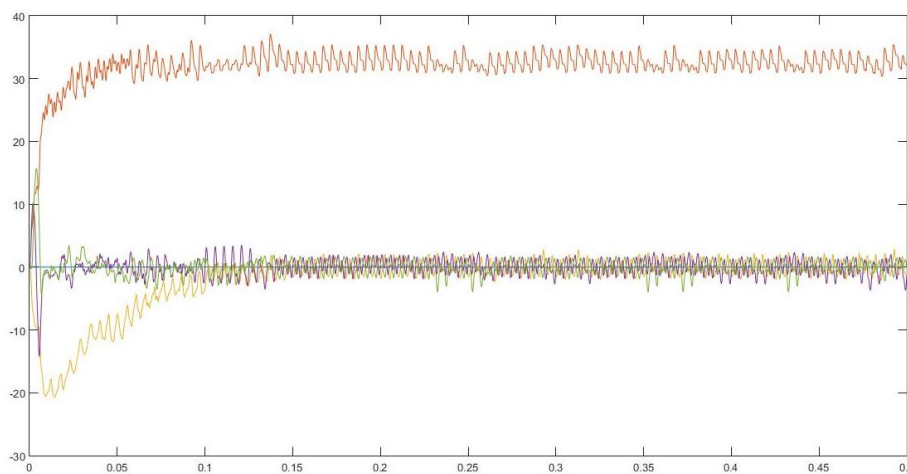


Figura 19: Corrientes de salida del inversor introduciendo las ecuaciones de desacoplo en la regulación

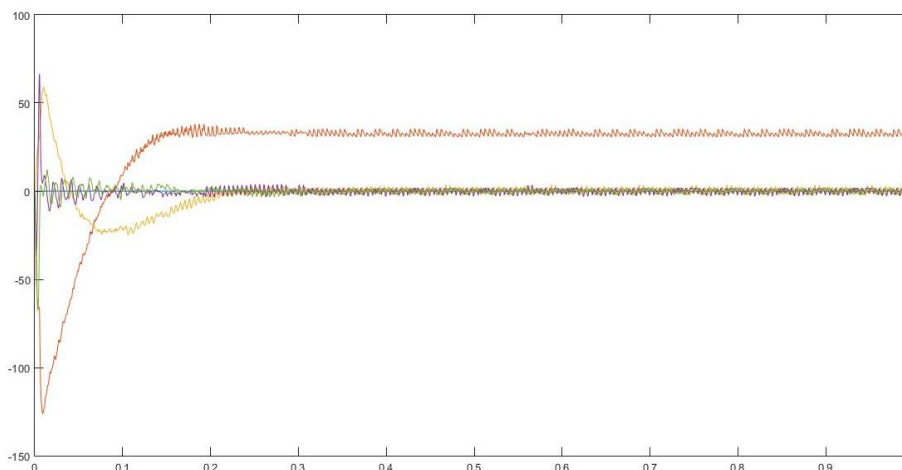


Figura 20: Corrientes de salida del inversor sin introducir las ecuaciones de desacoplo en la regulación

En las Figuras 19 y 20 se establece una comparación entre dos casos, el primero de ellos empleando las ecuaciones de desacoplo (34), (35), (36) y (37) mencionadas previamente, y el segundo sin ellas. En ambos casos el resto de condiciones del modelo se han mantenido iguales. Como se observa en la Figura 8, para  $t \approx 0.1s$  todas las variables han alcanzado ya su valor en régimen permanente, mientras que en el segundo caso, mostrado en la Figura 20, no lo alcanza hasta  $t \approx 0.2s$ , el doble de tiempo. Además, también se puede observar como el transitorio es mucho más acusado en este segundo caso, aunque en régimen permanente las oscilaciones en torno al valor final son menores.

Los valores de tensión obtenidos son los valores de la entrada al modulador del inversor, pero no están expresados en la referencia correcta. La entrada en este modulador ha de ser un único vector tensión, expresado en la referencia giratoria.

Sin embargo, no se pueden sumar directamente las dos componentes de tensión referidas al eje d y las dos componentes referidas al eje q, ya es al ser cada una de una red de secuencia diferente, su referencia no es la misma: mientras las componentes de secuencia directa giran en sentido  $\omega$ , las de secuencia inversa lo harán en sentido  $-\omega$ . Por tanto, es necesario transformarlas primero a una referencia común, que será la referencia estacionaria  $\alpha$ - $\beta$ . Esto se realiza según muestran las ecuaciones (38), (39), (40) y (41). Nuevamente,  $\theta$  representa el ángulo de la red.

$$\vec{V}_\alpha^+ = \vec{V}_d^+(t) \cdot \cos(\theta) - \vec{V}_q^+(t) \cdot \sin(\theta) \quad (38)$$

$$\vec{V}_\beta^+ = \vec{V}_d^+(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{V}_q^+(t) \cdot \cos(\theta) \quad (39)$$

$$\vec{V}_\alpha^- = \vec{V}_d^-(t) \cdot \cos(\theta) + \vec{V}_q^-(t) \cdot \sin(\theta) \quad (40)$$

$$\vec{V}_\beta^- = -\vec{V}_d^-(t) \cdot \sin(\theta) + \vec{V}_q^-(t) \cdot \cos(\theta) \quad (41)$$

Una vez realizada esta transformación, al encontrarse todas las componentes expresadas respecto de la una referencia estacionaria, ya se pueden sumar las dos componentes asociadas al eje  $\alpha$  y las dos referidas al eje  $\beta$  para obtener una única  $\vec{V}_\alpha$  y una  $\vec{V}_\beta$ .

$$\vec{V}_\alpha(t) = \vec{V}_\alpha^+(t) + \vec{V}_\alpha^-(t) \quad (42)$$

$$\vec{V}_\beta(t) = \vec{V}_\beta^+(t) + \vec{V}_\beta^-(t) \quad (43)$$

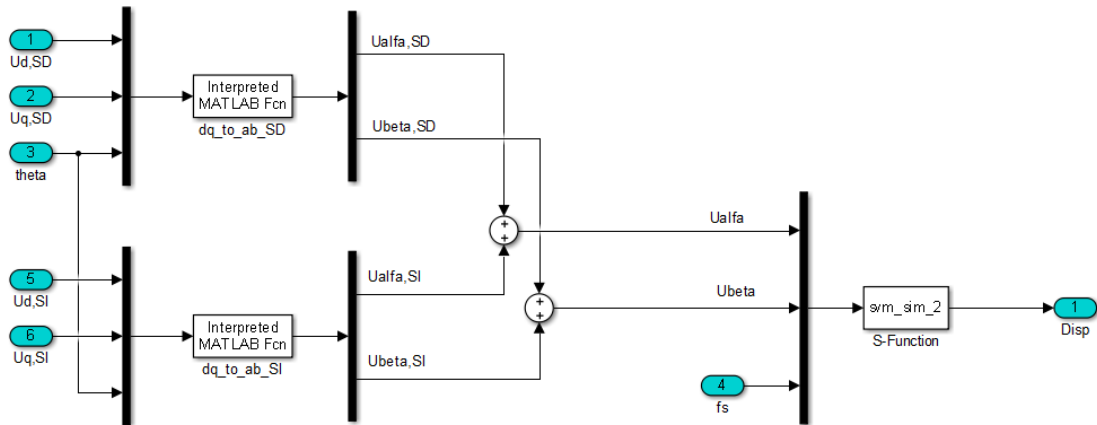


Figura 21: Esquema de Matlab-Simulink de la transformación inversa a partir de las redes de secuencia

El esquema de la Figura 21 muestra cómo se realizan las transformaciones explicadas previamente. Las componentes  $\vec{V}_\alpha$  y  $\vec{V}_\beta$  obtenidas, serán la entrada para la estrategia de modulación del inversor.

El inversor es el dispositivo encargado de convertir corriente continua en corriente alterna. Consta de tres ramas, cada una de ellas formada por dos semiconductores, dispositivos del tipo transistores IGBT, los cuales llevan asociados un diodo en antiparalelo, de forma que se permite una conducción bidireccional.

El principio del SVM se basa en el hecho de que solo hay ocho posibles vectores de tensión en un inversor trifásico, y que cualquier vector de tensión se puede a partir de una combinación de estos ocho. En la Figura 22 se observan los ocho vectores posibles, de los que 6 de ellos son vectores activos, y delimitan los seis

sextantes en los que se dividirá el plano, y los otros dos,  $\vec{V}_0$  y  $\vec{V}_7$ , que son vectores nulos. La existencia de dos vectores nulos se aprovechará para minimizar las conmutaciones del inversor, utilizando u otro en función de la posición de los interruptores en la conmutación anterior.

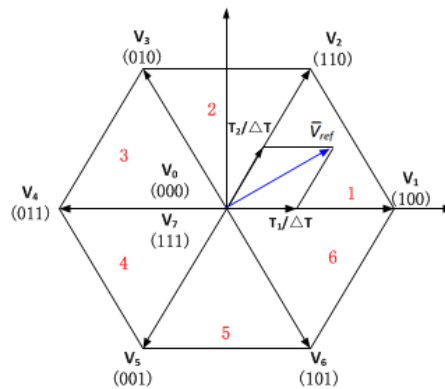


Figura 22: Representación de los ocho posibles vectores espaciales en el plano

Cada uno de los seis vectores activos se consigue mediante una combinación de interruptores en cada una de las tres ramas del inversor. Un 1 indica que la rama se encuentra conectada al lado positivo de la tensión continua; mientras que un 0 indica que se encuentra conectada al lado negativo de la tensión continua. La Figura 23 indica la disposición y la numeración de los interruptores en cada una de las tres ramas.

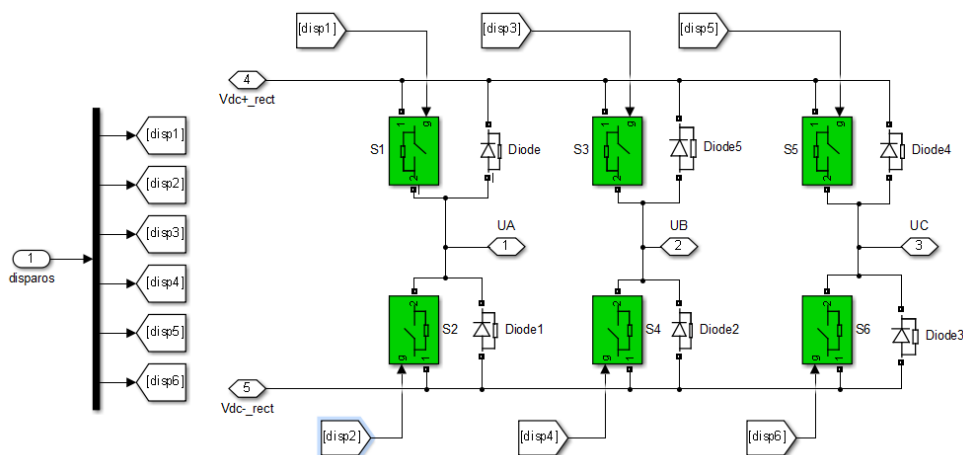


Figura 23: Disposición y numeración de los interruptores y los diodos en el inversor

De acuerdo con la Figura anterior, para conseguir cada uno de los ocho vectores posibles, deberán realizarse las combinaciones de interruptores indicadas en la



Tabla 1. Además, según dichas combinaciones, aparecerán a la salida del inversor las tensiones también indicadas.

Vector		Combinación de interruptores	Tensiones de fase de salida <sup>1</sup>		
			V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
$\vec{V}_0$	(000)	S2-S4-S6	0	0	0
$\vec{V}_1$	(100)	S1-S4-S6	2/3	-1/3	-1/3
$\vec{V}_2$	(110)	S1-S3-S6	1/3	1/3	-2/3
$\vec{V}_3$	(010)	S2-S3-S6	-1/3	2/3	-1/3
$\vec{V}_4$	(011)	S2-S3-S5	-2/3	1/3	1/3
$\vec{V}_5$	(001)	S2-S4-S5	-1/3	-1/3	2/3
$\vec{V}_6$	(101)	S1-S4-S5	1/3	-2/3	1/3
$\vec{V}_7$	(111)	S1-S3-S5	0	0	0

Tabla 1: Combinación de interruptores y valores de la tensión de la salida para cada vector espacial

La primera operación a realizar será determinar la magnitud y la posición del vector  $\vec{V}$ . Esto se determina calculando el módulo del vector a partir de las componentes  $\vec{V}_\alpha$  y  $\vec{V}_\beta$ , y el ángulo que forma dicho vector con la horizontal. Gracias a esto, podemos conocer en qué sextante se encuentra y, por tanto, entre qué dos vectores se encuentra.

---

<sup>1</sup> Cada tensión de fase de salida debe multiplicarse por U<sub>dc</sub>, el valor de la fuente de tensión continua.

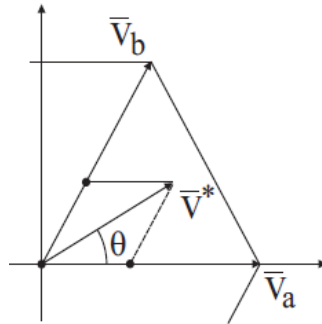


Figura 24: Representación del vector tensión de referencia y sus dos vectores espaciales adyacentes

El esquema seguido es el que se muestra en la Figura 24, donde  $\vec{V}^*$  representa el vector de referencia, y  $\vec{V}_a$  y  $\vec{V}_b$  sus dos vectores activos adyacentes.

La frecuencia de conmutación de este inversor es de 2,5 kHz, por tanto, el período de conmutación será de  $4 \cdot 10^{-4}$  s. El valor del vector de referencia  $\vec{V}^*$  se considerará constante dentro de cada ciclo de trabajo. Cada ciclo de trabajo se divide en dos semiperiodos, dentro del cual un tiempo estará aplicado el vector anterior ( $\vec{V}_a$ ), otro el vector posterior ( $\vec{V}_b$ ), y el restante uno de los dos vectores nulos. Estará aplicado aquel que se consiga realizando menos conmutaciones. El tiempo que está aplicado cada uno de los dos vectores adyacentes viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$t_a = m \cdot \frac{T}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \quad (44)$$

$$t_b = m \cdot \frac{T}{2} \cdot \sin(\gamma) \quad (45)$$

donde  $m$  representa el índice de modulación, que viene dado por  $m = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{U_{dc}}$ , siendo  $U$  el valor del módulo de la tensión, y  $U_{dc}$  la tensión en el bus de continua, que en este caso son 700 V. El valor de  $\gamma$  es el ángulo del vector tensión respecto de su vector activo inmediatamente precedente. El tiempo restante del semiperiodo corresponderá a alguno de los dos vectores nulos.

$$t_0 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{T}{2} - (t_a + t_b) \right) \quad (46)$$

El orden en el que se aplican los vectores  $\vec{V}_a$ ,  $\vec{V}_b$  y los vectores nulos dentro del ciclo de trabajo está fijado de forma que sea necesario realizar el menor número de conmutaciones y de forma que se consiga un mínimo contenido en armónicos. Las condiciones para que esto se cumpla son las siguientes:

- Se comienza con uno de los dos vectores nulos,  $\vec{V}_0$  o  $\vec{V}_7$ .
- Se realizan las conmutaciones.
- Se llega a otro estado nulo al final del primer semiperiodo.
- Se repite la secuencia en sentido inverso, terminando el ciclo con el estado nulo inicial.

El orden en que se realizan las conmutaciones varía si el vector de referencia se encuentra en un sector par o impar. Llamando k al sector en el que se encuentra el vector de referencia:

- Si k es impar, la secuencia de los vectores será:

$$\vec{V}_0, \vec{V}_k, \vec{V}_{k+1}, \vec{V}_7, \vec{V}_7, \vec{V}_{k+1}, \vec{V}_k, \vec{V}_0$$

- Si k es par, la secuencia de los vectores será:

$$\vec{V}_0, \vec{V}_{k+1}, \vec{V}_k, \vec{V}_7, \vec{V}_7, \vec{V}_k, \vec{V}_{k+1}, \vec{V}_0$$

De esta manera, se obtendrá a la salida una señal de tensión pulsada, cuyo armónico fundamental será equivalente al valor de la tensión de referencia en la entrada del inversor.

El código de Matlab empleado en la estrategia de la modulación en vectores espaciales (SVPWM) se encuentra en el Anexo I, mientras que el código empleado para realizar las transformaciones de corriente y de tensión se encuentra en el Anexo II.



## 6. PARTE 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertido electrónico

En esta primera parte se estudiará, como se ha mencionado previamente en el apartado “Descripción del modelo”, el caso en el que toda la potencia demandada por la carga sea suministrada por el sistema de generación alternativo, incluyendo la compensación que pueda existir entre las distintas fases si la carga es desequilibrada, tal y como se muestra en la Figura 25. Se ha representado el sistema de generación como una fuente de tensión continua de 700 V a través del convertidor trifásico DC/AC.

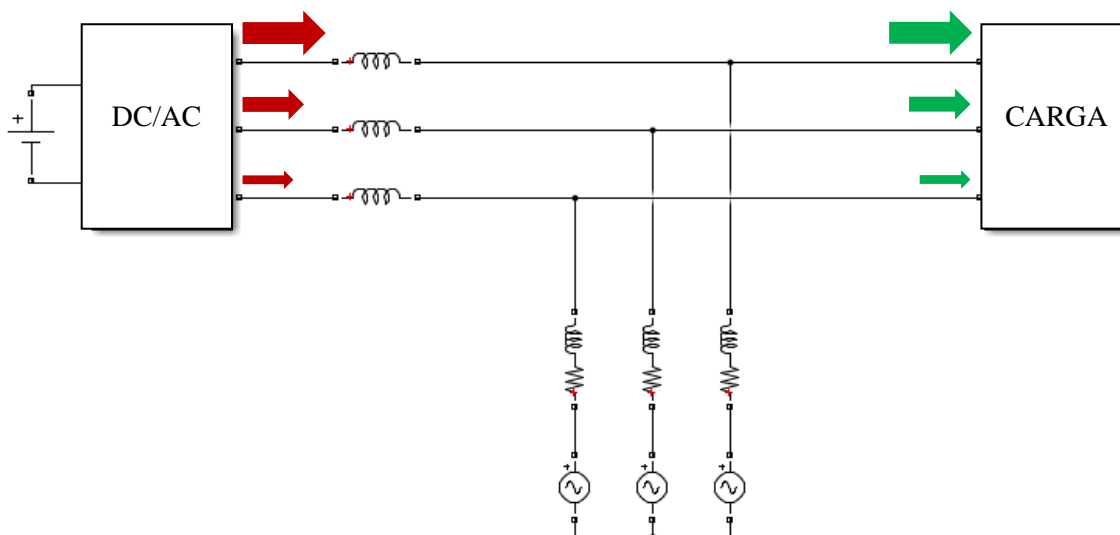


Figura 25: Esquema general de la Parte 1 del estudio

Para ello, se utilizará la medida de las corrientes en la carga como referencia para el sistema de control del inversor, de forma que en régimen permanente se consiga que los valores de la corriente de salida del inversor sean iguales a los valores demandados por las cargas conectadas a éste.

Todas las simulaciones han sido realizadas con la herramienta *Simulink* de Matlab. En el siguiente esquema de la Figura 26 se muestra como se ha realizado el esquema general de la Figura 25 en el entorno de *Simulink*. En el lado izquierdo se encuentra representado el inversor junto con la fuente de tensión continua, y en paralelo con ésta, los bloques que simulan la red. En la parte derecha se encuentran las cargas, que irán variando su valor a lo largo de los distintos ensayos. El bloque azul de la parte

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

superior conduce al circuito de control, por lo que como variables de entrada necesitará: los valores medidos de las corrientes en la carga, los valores de corriente a la salida del inversor y el ángulo  $\theta$ , calculado a partir de las tensiones de red.

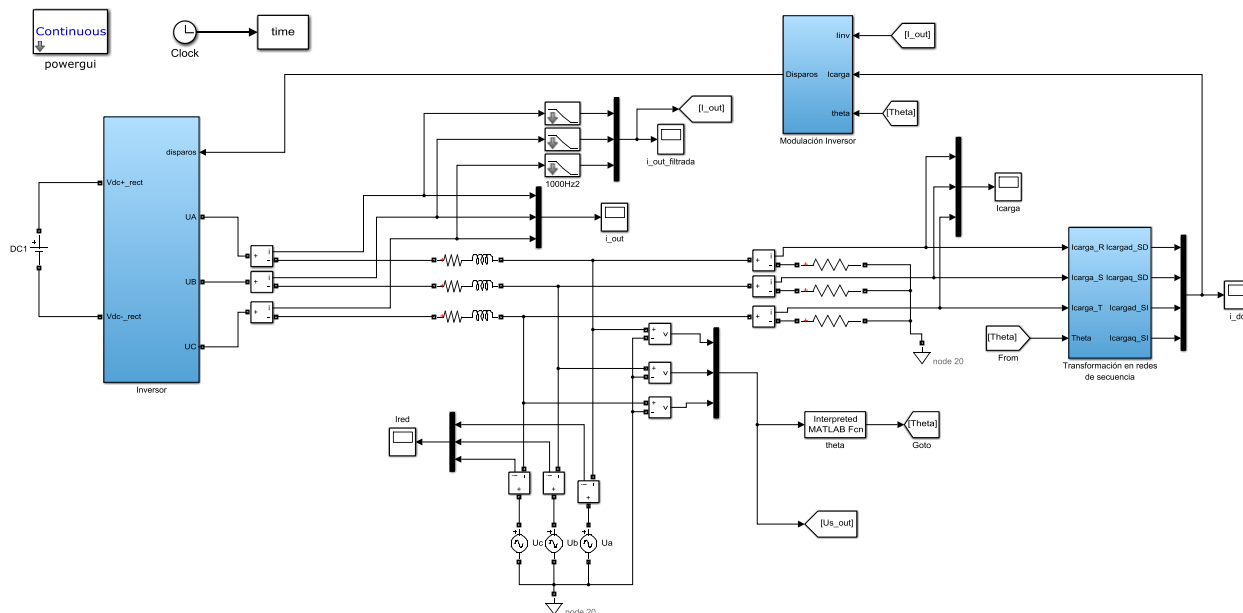


Figura 26: Esquema en Matlab-Simulink del circuito de potencia

A continuación, a partir de estas variables de entrada, ya se puede pasar al esquema de control, que aparece representado en la Figura 27. En él, a partir de la comparación entre las corrientes de la carga y las de salida del inversor (ya expresadas ambas en sus componentes d-q de las redes de secuencia directa e inversa) se obtendrá el error que, tras pasar por un regulador P-I dará lugar a las tensiones de referencia en el inversor.

Tras ser expresadas en la referencia correcta, estas tensiones serán la entrada para la estrategia de modulación en el inversor, que como se recuerda, era la técnica de PWM con vectores espaciales (SVPWM). La salida de este bloque serán los disparos de cada uno de los seis interruptores del inversor, que generarán a la salida de éste la forma de onda de corriente deseada.

En ambos casos se han eliminado, para simplificar la representación del esquema, todos los bloques necesarios para la posterior representación en gráficas de las distintas variables que se desean observar.

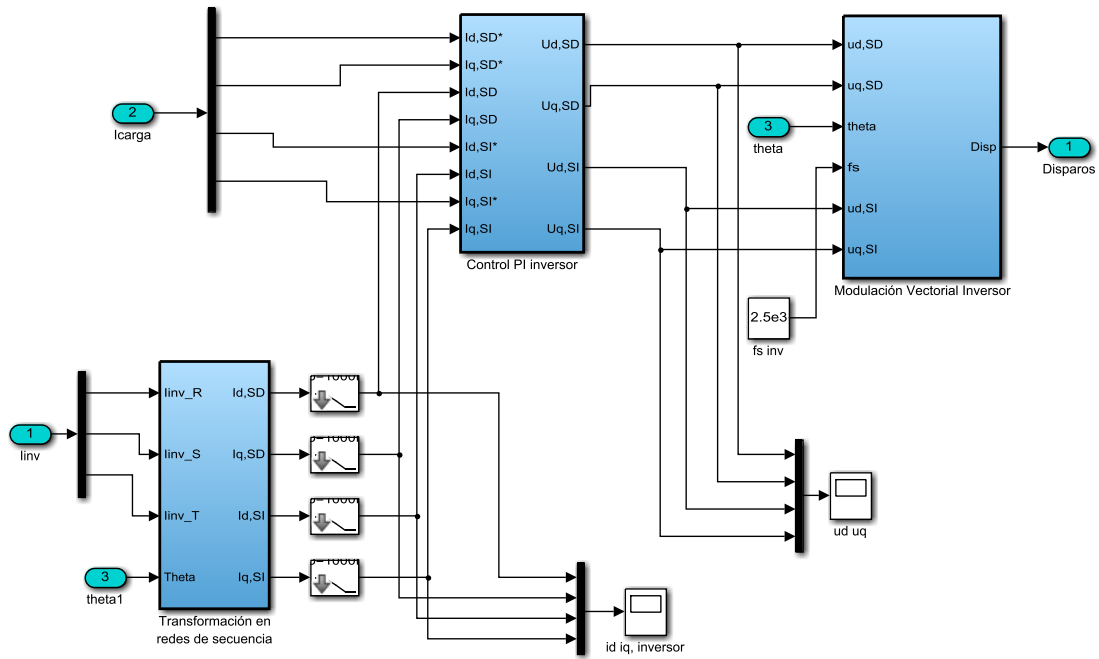


Figura 27: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de control

A continuación, se estudiarán distintos casos, con distintos valores de carga, y se analizarán los resultados obtenidos.

### 6.1 CASO 1: Carga trifásica con el mismo consumo en las tres fases

En primer lugar, se analizará un caso equilibrado, en el que la carga estará constituida por tres resistencias iguales en estrella, cada una de ellas de valor  $R=10 \Omega$ . La potencia consumida en este caso por la carga será:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{línea} \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

donde la tensión de línea, establecida por la red, es igual a 400 V. La corriente consumida por cada una de las fases será  $I = \frac{U_{fase}}{R} = \frac{230}{10} = 23A$ . Al tratarse únicamente de carga resistiva, el valor de  $\cos(\varphi)$  será 1, por lo que el valor de la potencia que consumen el conjunto de las tres cargas será:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{línea} \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 23 = 15.934,86 W$$

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

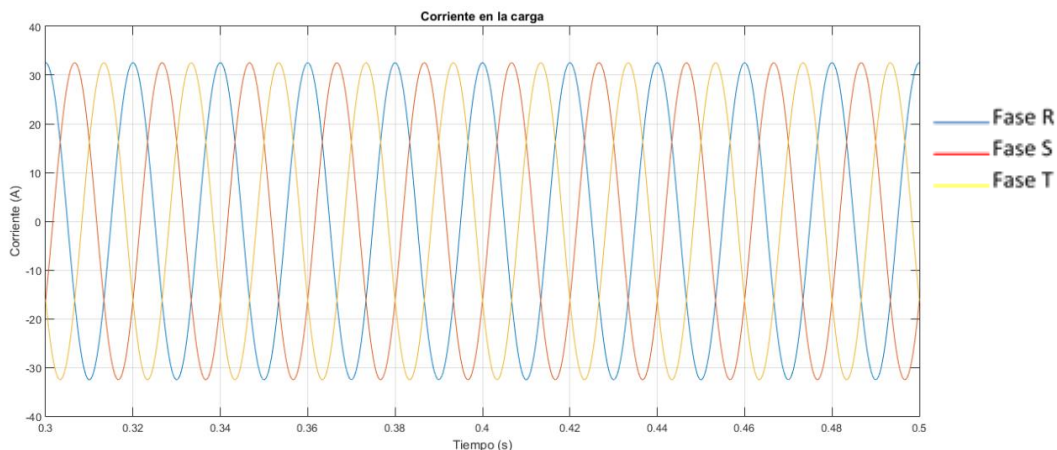


Figura 28: Caso 1. Medida de corriente en la carga en componentes trifásicas

La Figura 28 representa la medida de las corrientes en la carga, en sus componentes trifásicas. Como corresponde, al tratarse de tres cargas equilibradas, el valor en las tres fases será igual, solamente desplazado 120° respecto de la fase anterior. El valor de la corriente obtenida se corresponde con el calculado previamente, ya que la amplitud de la onda de corriente es de 32,5 A, por lo que obteniendo su valor eficaz,  $\frac{32,5}{\sqrt{2}} = 22,98 \approx 23$  A.

Estas componentes trifásicas son convertidas, mediante las transformaciones explicadas anteriormente, en sus componentes d-q en las redes de secuencia directa e inversa.

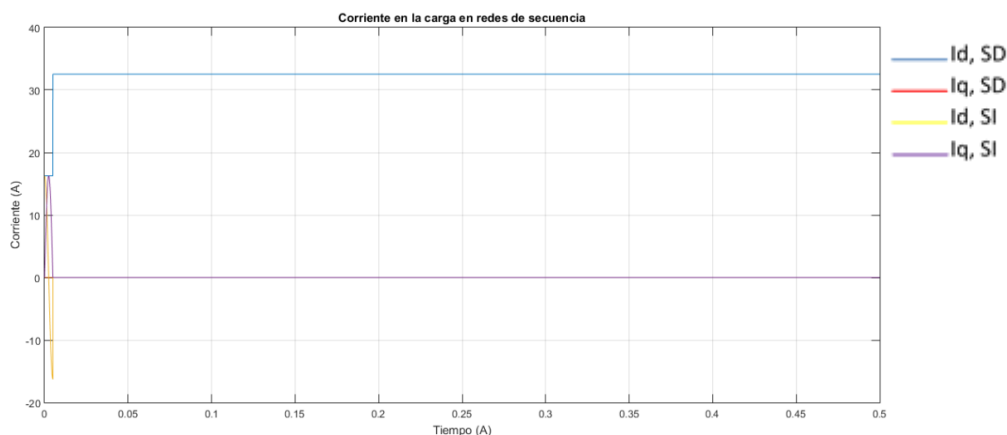


Figura 29: Caso 1. Corrientes en la carga en redes de secuencia

Tal y como se observa en la Figura 29, tras un brevísimo transitorio, las cuatro componentes toman sus valores finales, que son valores constantes. Ambas componentes de secuencia inversa se encuentran superpuestas, y de valor 0. El resultado obtenido es lógico, ya que al no haber ningún desequilibrio en la carga, toda la corriente es equivalente a la corriente de secuencia directa. Sin embargo, debe tenerse en cuenta



que si, en este mismo caso, la red fuera de secuencia inversa, el resultado sería justamente el opuesto, como se puede comprobar en la Figura 6, donde se muestra un ejemplo de cómo sería la corriente en la carga en redes de secuencia si la red fuera de secuencia inversa.

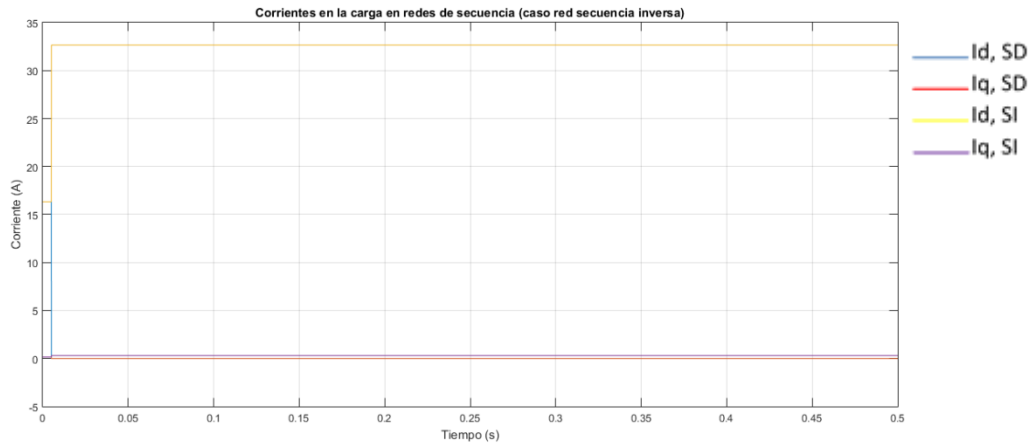


Figura 30: Corriente en la carga para el caso 1 si la red fuera de secuencia inversa

En este caso, como se observa en la Figura 30, al tratarse de una carga equilibrada, toda la corriente de la carga sería igual a la corriente de la componente inversa, y las dos componentes de secuencia directa serán igual a 0. Continuaremos el resto del análisis considerando la red de secuencia directa previa.

Una vez obtenida la corriente en la carga, los reguladores deberían estar ajustados para que, tras el transitorio, las corrientes del inversor fueran iguales a la de la carga. La Figura 31 muestra los valores obtenidos referidos a las corrientes del inversor.

Debido a la forma de onda de corriente característica a la salida del inversor (se observará posteriormente), que debido a la tensión pulsada presenta un gran número de armónicos de alta frecuencia, dichas corrientes expresadas en sus componentes en redes de secuencia también presentarán oscilaciones. Por ello, las corrientes son filtradas con un filtro paso-bajo de 1000 Hz con el fin de eliminar parcialmente dichas oscilaciones. Es un valor relativamente alto, para que los resultados finales no estén muy distorsionados respecto de los originales. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 31.

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

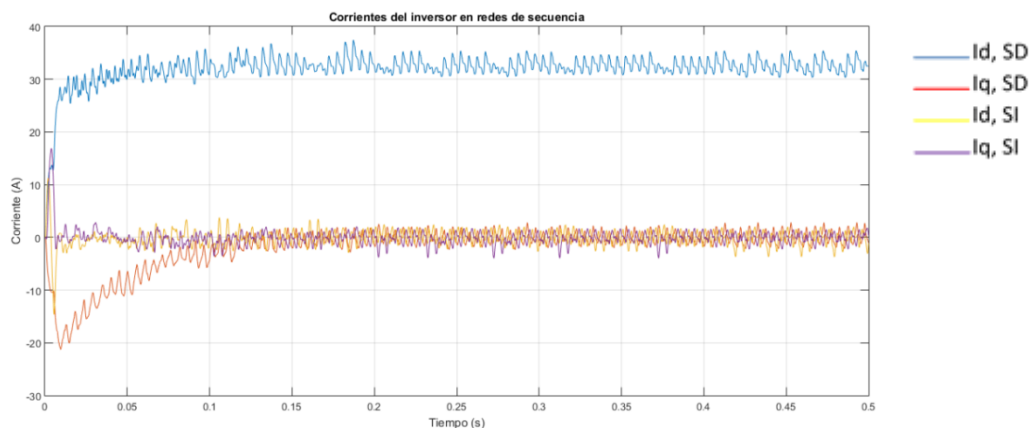


Figura 31: Caso 1. Corrientes en el inversor en redes de secuencia

A partir de la gráfica de la Figura 31 se pueden extraer varias conclusiones:

- El transitorio hasta alcanzar el régimen permanente es breve; en 0,1 s las corrientes ya han tomado sus valores finales, por lo que el tiempo de simulación utilizado (0,5 s) es suficiente para observar el comportamiento de las variables tanto en régimen transitorio como en régimen permanente.
- La rapidez del sistema se debe también en parte a, como se mencionó anteriormente, las ecuaciones de desacoplo existentes entre las componentes  $I_d$  e  $I_q$  de cada una de las dos redes de secuencia. Esto también provoca una mayor oscilación en los valores en régimen permanente.
- Los valores obtenidos para las corrientes en el inversor son muy semejantes a las referencias, como se puede observar en la Figura 32. En ambos casos, la única componente no nula será la componente d de secuencia directa.

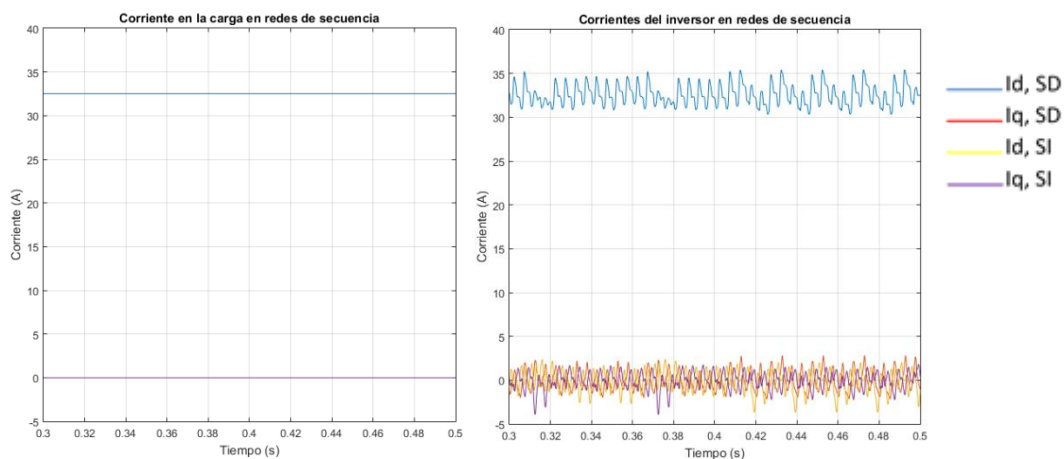


Figura 32: Caso 1. Comparación entre la corriente en la carga y la corriente en el inversor

Las corrientes del inversor, expresadas en forma de sus componentes trifásicas, se encuentran representadas en la Figura 33. Como se mencionaba anteriormente, presentan un rizado característico, debido a que el inversor no genera una tensión senoidal a su salida, sino que es una señal cuadrada y pulsada, cuyo primer armónico sí puede asemejarse a una onda senoidal de tensión, pero presenta muchos armónicos que también provocan los armónicos en la corriente.

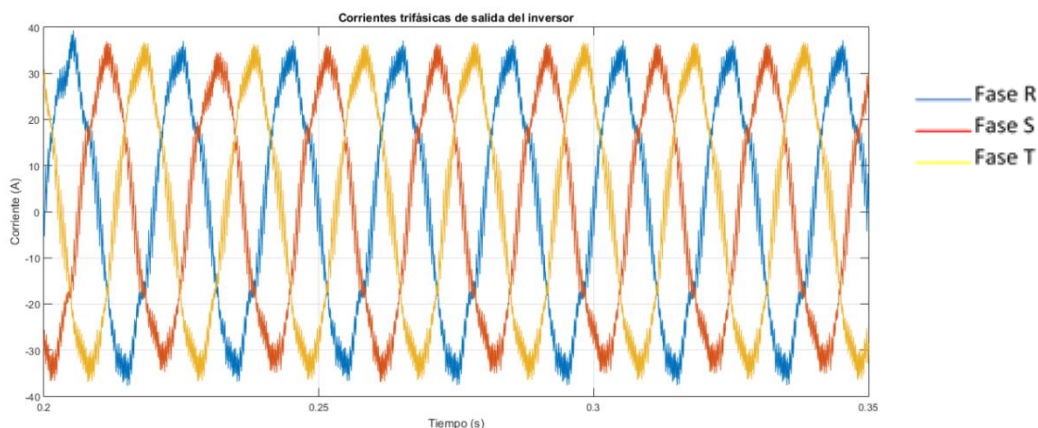


Figura 33: Caso 1. Corrientes de salida del inversor sin filtrar

Es imposible poder eliminar todos los armónicos por completo; además, la onda filtrada estaría demasiado distorsionada respecto de la original y se encontraría muy desplazada respecto de ésta, por lo que la respuesta ante cambios sería más lenta. Sin embargo, al tratarse de armónicos de alta frecuencia, al emplear un filtro con una frecuencia de corte alta, se obtiene un buen resultado y no se distorsiona demasiado la onda. El resultado obtenido tras filtrar las corrientes de salida con un filtro paso-bajo a 1000 Hz de frecuencia se observa en la Figura 34.

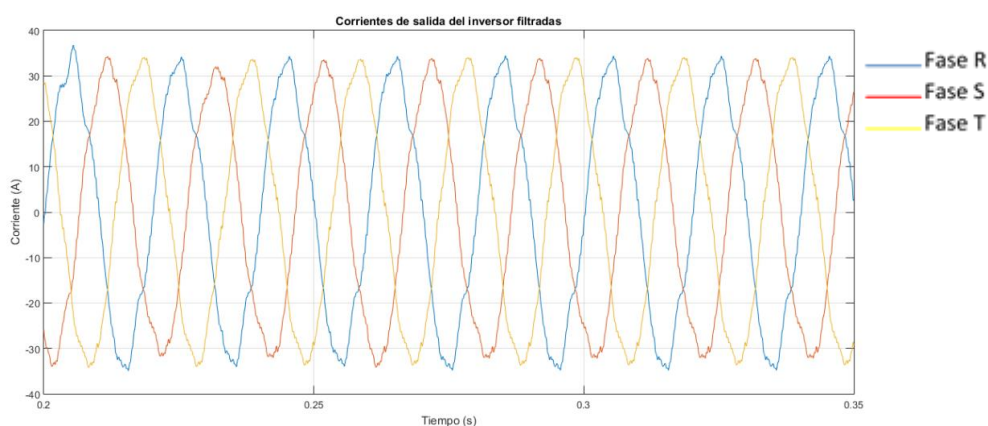


Figura 34: Caso 1. Corrientes de salida del inversor filtradas

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

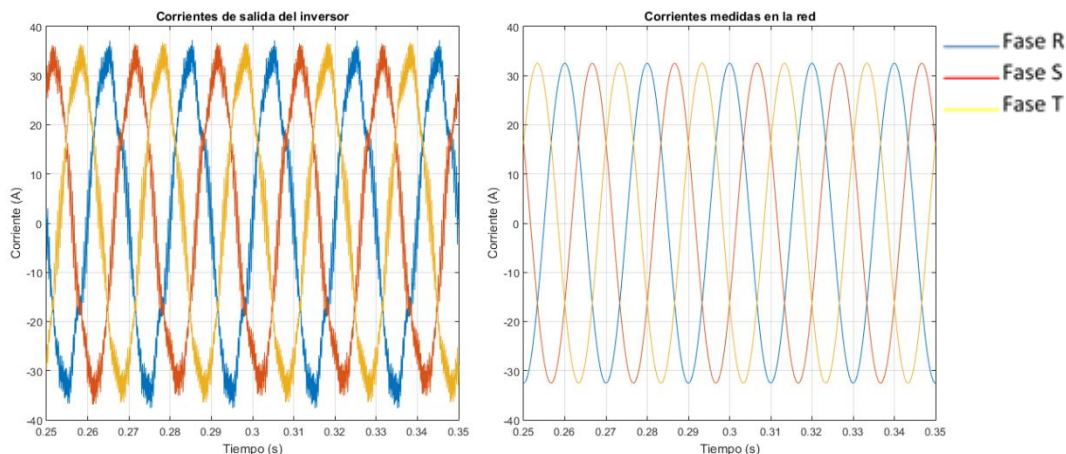


Figura 35: Caso 1. Comparación entre corriente de salida del inversor y corriente en la carga

La comparación de las corrientes trifásicas de salida del inversor y las corrientes en la carga está representada en la Figura 35. Teniendo en cuenta que las corrientes del inversor son generadas por un dispositivo electrónico a partir de la apertura y cierre de interruptores, el resultado obtenido es aceptable.

Por último, se muestra como ejemplo el valor de una de las tensiones de línea a la salida del inversor. Como se observa en la Figura 36, los dos únicos valores que toma ésta son, además de 0, 700 y -700, que en valor absoluto es el valor de la tensión en el lado de continua del inversor. Variando el ancho de los pulsos a lo largo del ciclo, se consigue el resultado deseado: que el primer armónico de esta señal sea una señal sinusoidal. Las otras dos tensiones tendrán el mismo aspecto que la mostrada, únicamente desfasadas 120°.

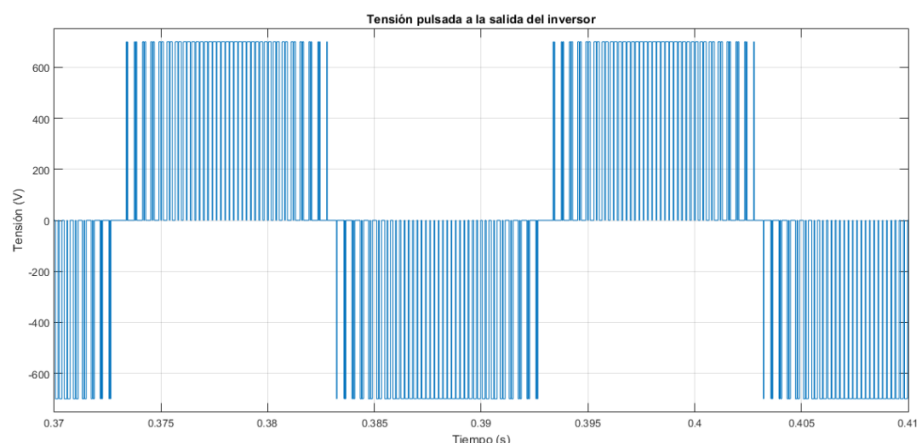


Figura 36: Tensión pulsada a la salida del inversor

## 6.2 CASO 2: Carga trifásica con consumo distinto en una de las tres fases

En este segundo caso, se estudiará la respuesta del inversor cuando el valor de una de las tres cargas es diferente. Para ello, se utilizaron como carga tres resistencias, teniendo la de la fase R un valor de  $25 \Omega$ , y dos resistencias iguales de  $10 \Omega$  cada una para las fases S y T. Al mantenerse el valor de tensión constante e igual a la tensión de red, la corriente absorbida por cada una de las fases será diferente, como se puede observar en la Figura 37.

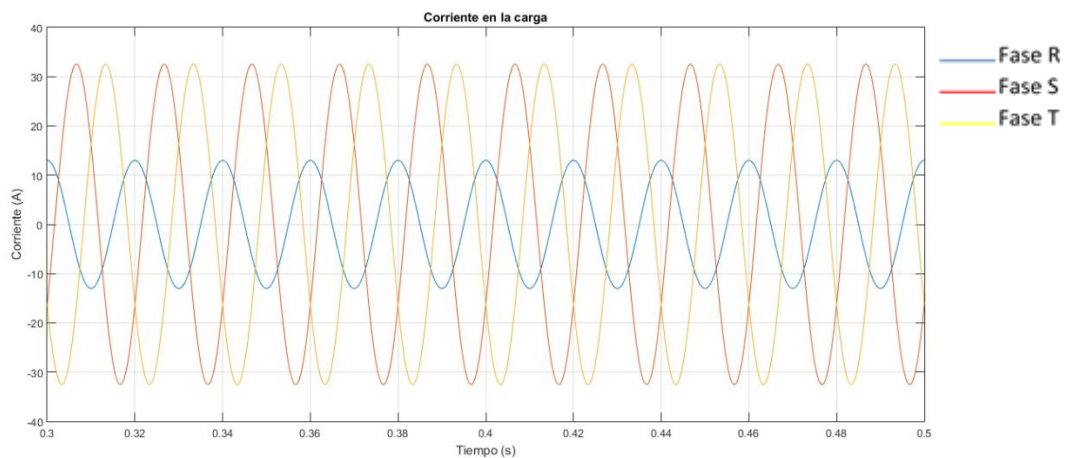


Figura 37: Caso 2. Corriente en la carga

En este caso, la potencia demandada por la carga se puede calcular como la suma de las potencias consumidas en cada una de las tres fases:

$$P = U_{fase} \cdot I_R + U_{fase} \cdot I_S + U_{fase} \cdot I_T$$

En todos los casos,  $U_{fase}$  será igual a 230 V, mientras que las corrientes por cada una de las fases serán:

$$I_R = \frac{U_{fase}}{R_R} = \frac{230}{25} = 9,2 A$$

$$I_S = I_T = \frac{U_{fase}}{R_S} = \frac{230}{10} = 23 A$$

Por lo que la potencia total consumida será:

$$P = 230 \cdot (9,2 + 23 + 23) = 12696 \text{ W}$$

En este caso, como las corrientes de la carga ya no son equilibradas, sí existirá componente de secuencia inversa. Se puede comprobar en la Figura 38 como así es. En este caso, tanto la componente d de la red de secuencia directa como de la de secuencia inversa tienen un valor distinto de 0.

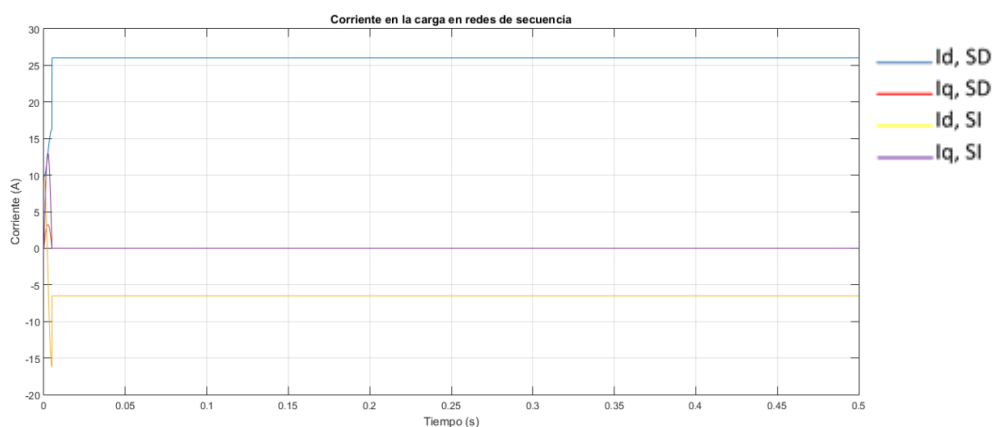


Figura 38: Caso 2. Corriente en la carga en redes de secuencia

En cuanto a las corrientes obtenidas a la salida del inversor, si observamos la evolución de sus componentes d-q en sus redes de secuencia, en la Figura 39, observamos como la evolución hasta el valor final en régimen permanente es muy rápido, y no presenta picos de corriente excesivamente elevados. De nuevo, al comparar los valores de corriente obtenidos a la salida del inversor con los medidos en la carga, observamos que oscilan siempre en torno al valor existente en la carga para dicha componente.

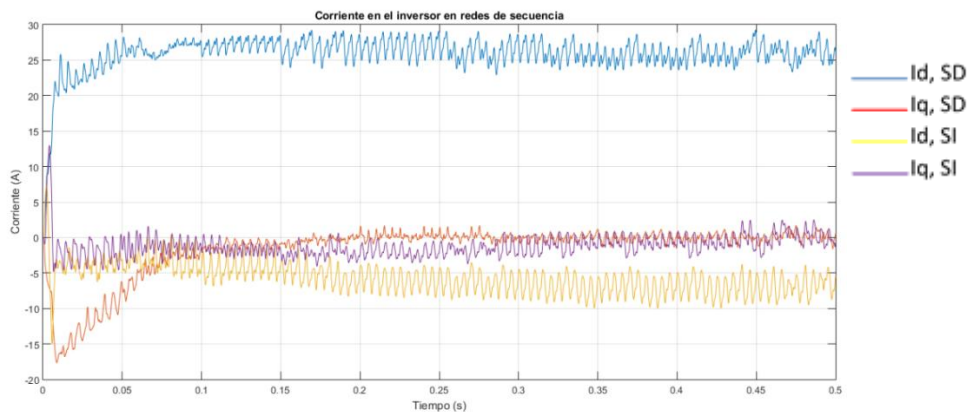


Figura 39: Caso 2. Corrientes del inversor en redes de secuencia

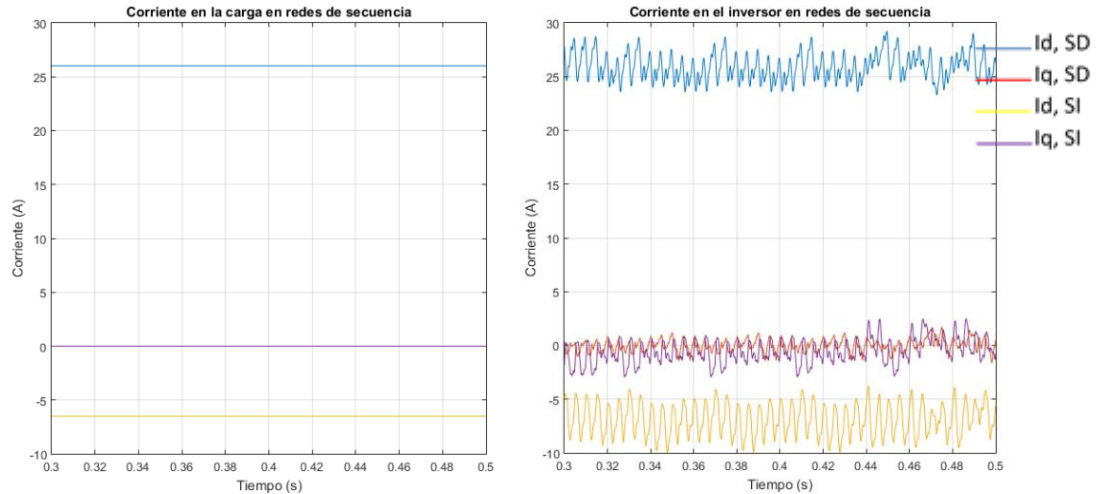


Figura 40: Caso 2. Comparación entre la corriente en la carga y la corriente en el inversor

Es interesante hacer una comparación de los transitorios que presentan las corrientes a la salida del inversor entre el esquema de control empleado actualmente, utilizando las ecuaciones de desacoplo entre  $I_d$  e  $I_q$  para cada una de las dos redes de secuencia, y otro sin ellas. Las ecuaciones utilizadas eran las siguientes:

$$U_{d,SD} = U_{d,SD}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SD} + U_{red}$$

$$U_{q,SD} = U_{q,SD}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SD}$$

$$U_{d,SI} = U_{d,SI}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SI}$$

$$U_{q,SI} = U_{q,SI}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SI}$$

En el caso de utilizar las ecuaciones de desacoplo, serán las componentes  $U_i$  las que formen posteriormente el vector de tensión de referencia de entrada para la estrategia de modulación, mientras que en caso de no utilizarse, serán directamente las componentes  $U_i^*$  las que compongan dicho vector.

La Figura 41 representa las corrientes medidas a la salida del inversor, expresadas en sus componentes trifásicas, durante el primer 0,1 s de la simulación. Teniendo en cuenta que la escala del eje Y en ambos gráficos no es la misma, presentan grandes diferencias. Mientras que en la gráfica de la izquierda, empleando las ecuaciones de desacoplo, el transitorio no supera en ningún momento los valores de la corriente en régimen permanente, en el caso de no utilizarlas, el valor de la corriente durante los primeros instantes llega casi a 150 A, unos valores muy superiores a los que posteriormente tendrá en régimen permanente. Si esto se produce de manera repetida y

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

los semiconductores no están diseñados para soportar dichos niveles de corriente, puede producir daños en el equipo. Por ello, consideraremos utilizar el modelo con las ecuaciones de desacoplo implementadas.

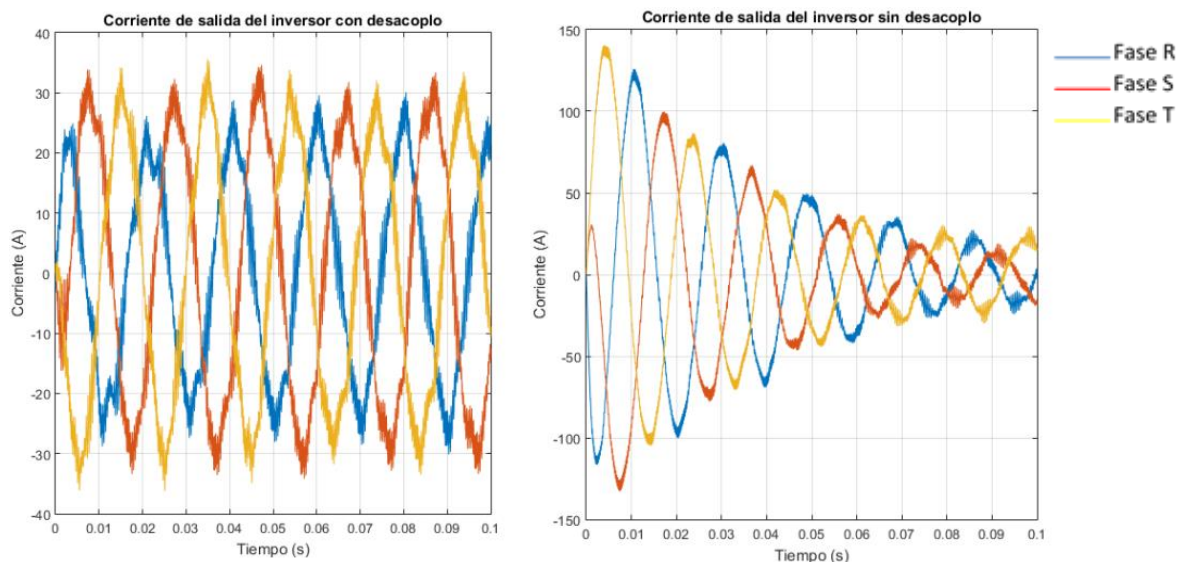


Figura 41: Caso 2. Comparación del transitorio con y sin ecuaciones de desacoplo

Por último, la Figura 42 muestra la comparación entre las corrientes de salida del inversor, sin ningún filtrado aún, y las corrientes en la carga.

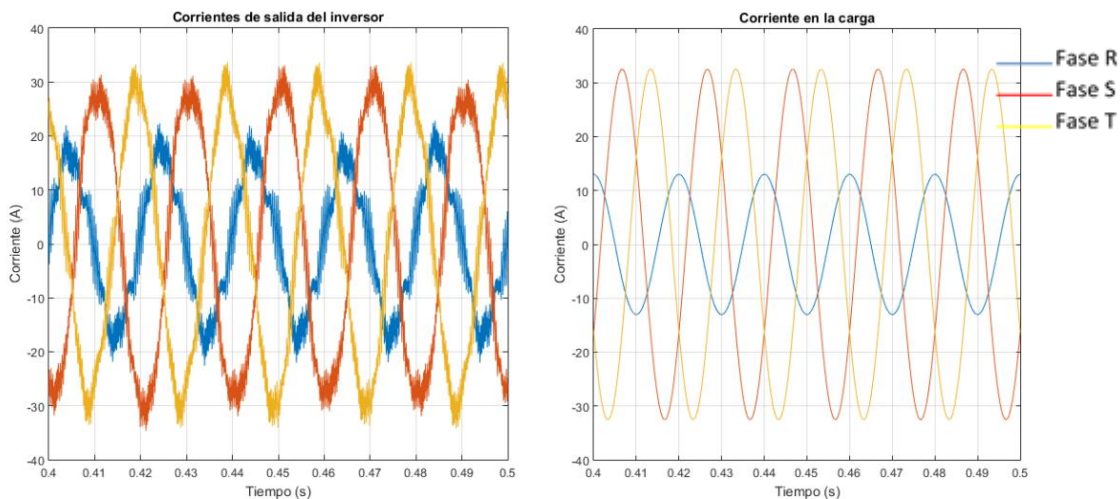


Figura 42: Caso 2. Comparación entre corriente de salida del inversor y corriente en la carga



### 6.3 CASO 3: Carga trifásica con consumo distinto en las tres fases

Este caso se analizará más rápidamente debido a su similitud con el caso anterior. En este tercer caso, cada una de las tres fases tendrá un consumo diferente, ya que el valor de la carga en la fase R será de  $25 \Omega$ , en la fase S  $10 \Omega$ , y  $5 \Omega$  en la fase T. En este caso, las corrientes y la potencia consumida por la carga serán:

$$I_R = \frac{U_{fase}}{R_R} = \frac{230}{25} = 9,2 A$$

$$I_S = \frac{U_{fase}}{R_S} = \frac{230}{10} = 23 A$$

$$I_T = \frac{U_{fase}}{R_T} = \frac{230}{5} = 46 A$$

$$P = U_{fase} \cdot I_R + U_{fase} \cdot I_S + U_{fase} \cdot I_T = 230 \cdot (9,2 + 23 + 46) = 17986 W$$

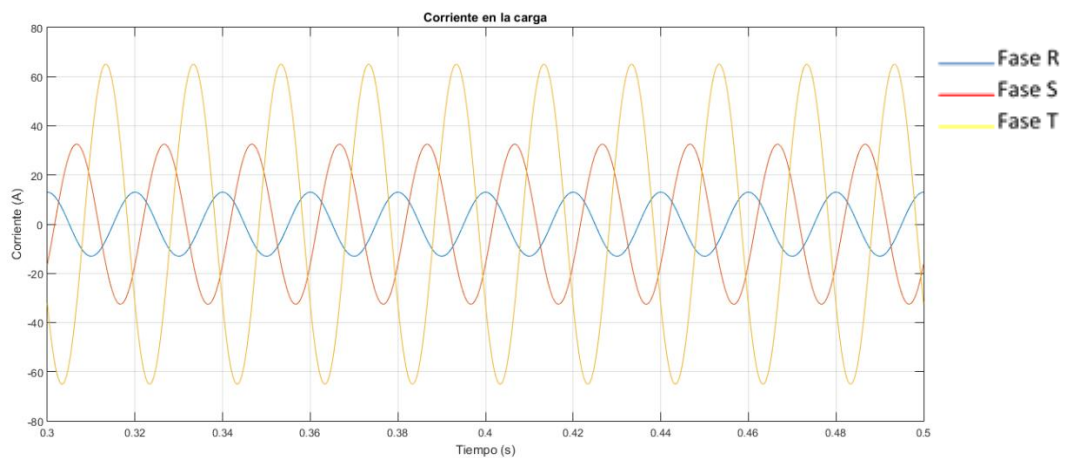


Figura 43: Caso 3. Medida de corrientes en la carga

En la Figura 43 se observan las corrientes en la carga en sus componentes trifásicas, mientras que en la Figura 44 se encuentran ya transformadas en sus redes de secuencia. Al igual que en el caso anterior, al tratarse de cargas desequilibradas, tanto las componentes de secuencia directa como las de secuencia inversa presentarán valores no nulos.

## Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

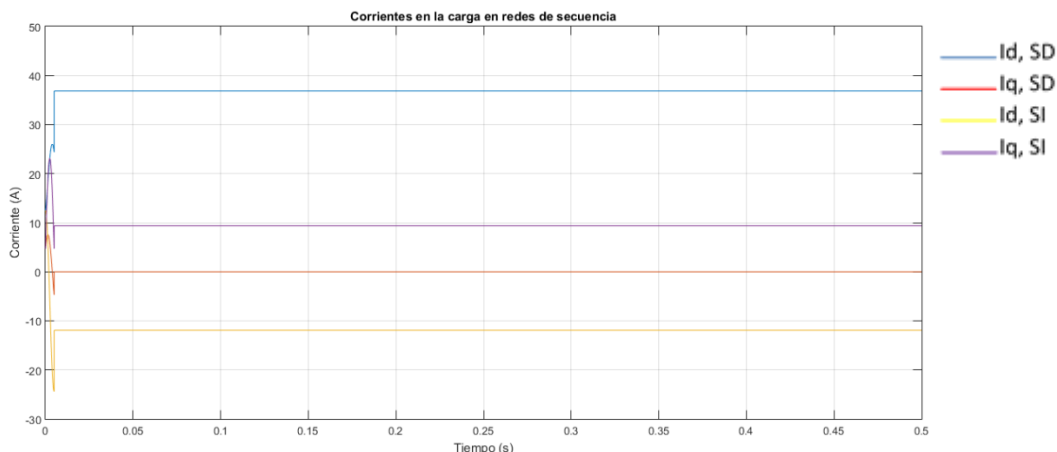


Figura 44: Caso 3. Medida de las corrientes en la carga en redes de secuencia

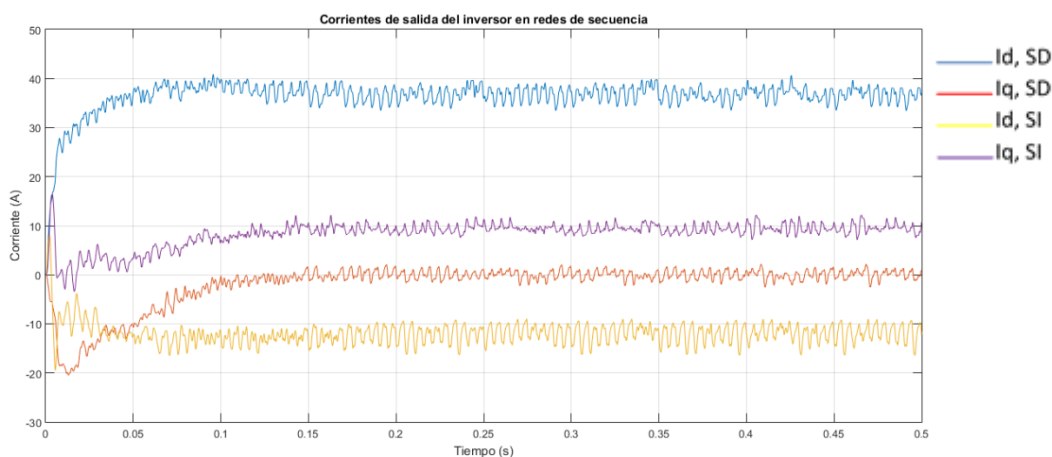


Figura 45: Caso 3. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia

Por último, se presenta la forma de onda de las corrientes de salida del inversor, expresadas en las componentes d-q de sus redes de secuencia. Como se puede observar, presentan un rápido transitorio y sus valores en régimen permanente son semejantes a los obtenidos a partir de las corrientes en la carga.

### 6.4 CASO 4: Carga entre dos fases y neutro con consumo nulo en la otra

Puede ocurrir que, en vez de que simplemente el consumo entre fases sea diferente, en alguna de las fases no haya ninguna carga conectada. Esta situación es la que se va a analizar en el siguiente caso.

En este caso, en la fase R no habrá ninguna carga conectada, mientras que entre las fases S y T y el neutro, habrá en cada una de las fases una resistencia de  $10 \Omega$ . Por tanto, la potencia total absorbida por la carga será:

$$I_S = I_T = \frac{U_{fase}}{R_S} = \frac{230}{10} = 23 A$$

$$P = U_{fase} \cdot I_S + U_{fase} \cdot I_T = 230 \cdot (23 + 23) = 10580 W$$

Las formas de onda de la corriente medida en la carga están representadas en la Figura 46. Como era esperable, al encontrarse la fase R en circuito abierto, la corriente por dicha fase será nula.

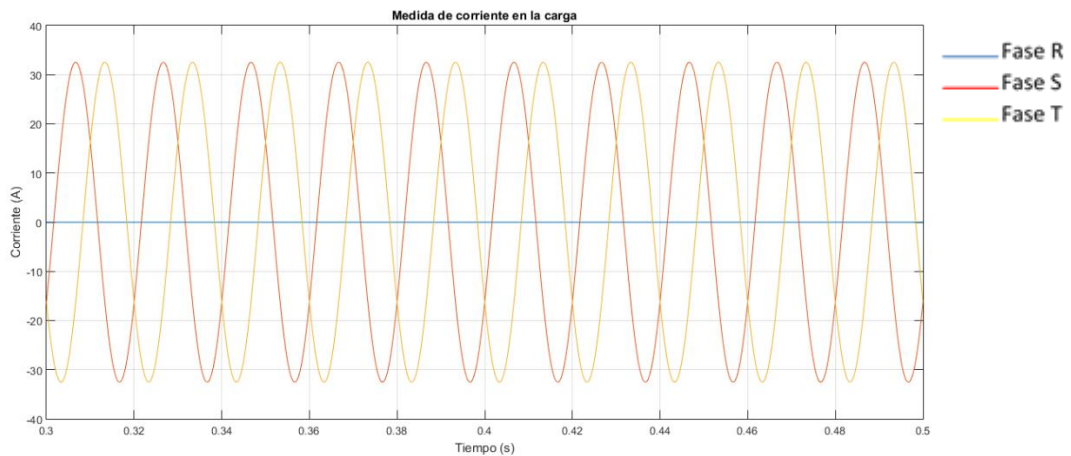


Figura 46: Caso 4. Medida de las corrientes en la carga

Aunque la carga en las otras dos fases sea igual, y así se ve en la forma de onda de sus corrientes, el conjunto trifásico es visto como una carga desequilibrada. Esto se puede comprobar al descomponer dichas ondas de corriente en sus redes de secuencia, donde se observa que ambas componentes de secuencia inversa (la línea amarilla la componente d y la línea morada la componente q) presentan valores distintos de 0. Recordamos que en una carga equilibrada las dos componentes de secuencia inversa deberían valer 0.

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

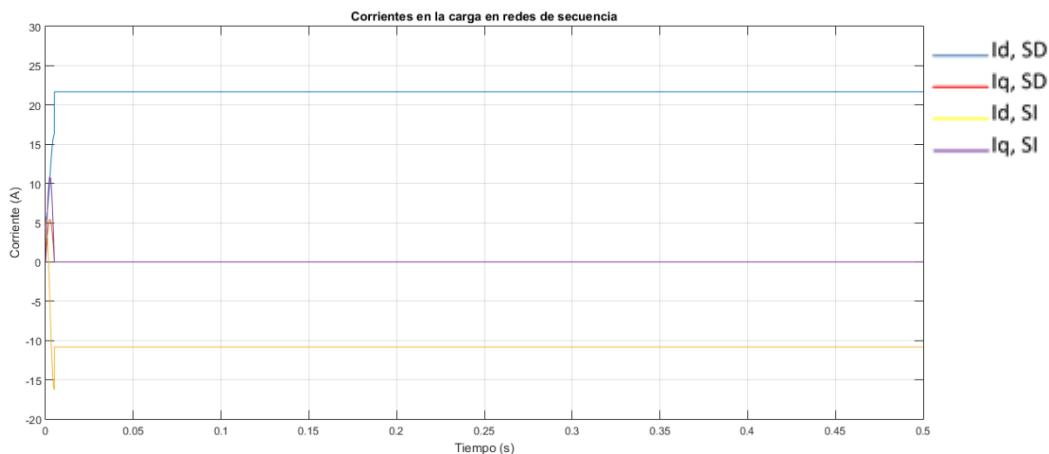


Figura 47: Caso 4. Corrientes en la carga en redes de secuencia

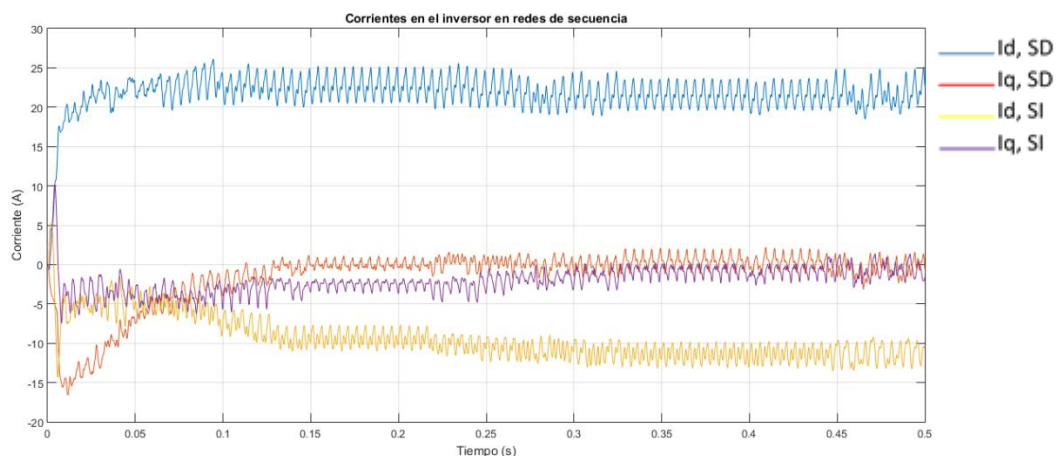


Figura 48: Caso 4. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia.

Los valores obtenidos para las corrientes del inversor presentan, en este caso, una mayor oscilación hasta establecerse en el régimen permanente, sobre todo las dos componentes del eje q, tanto de secuencia directa como de secuencia inversa. Sin embargo, si prolongamos esta simulación hasta  $t=1$  s, observamos como ambas alcanzan el valor deseado, e igual a 0, como se puede observar en la Figura 49.

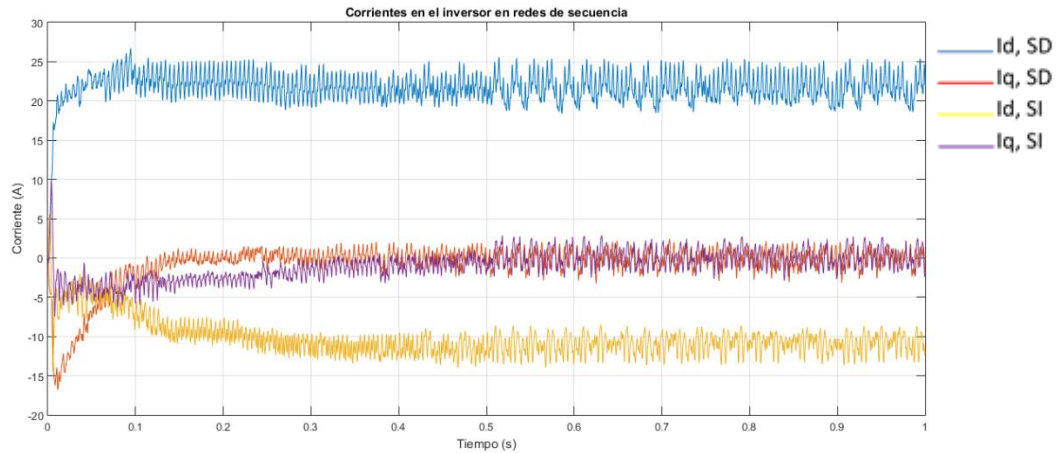


Figura 49: Caso 4. Corrientes en el inversor en redes de secuencia prolongando el tiempo de simulación

Por último, en la Figura 50 se observa el valor de las corrientes a la salida del inversor expresadas en sus componentes trifásicas, comparadas con los valores de la corriente en la carga. Las dos componentes de las fases S y T se corresponden con las demandadas por la carga, mientras que aparece una también una componente en la fase R, que deberá ser absorbida por la red.

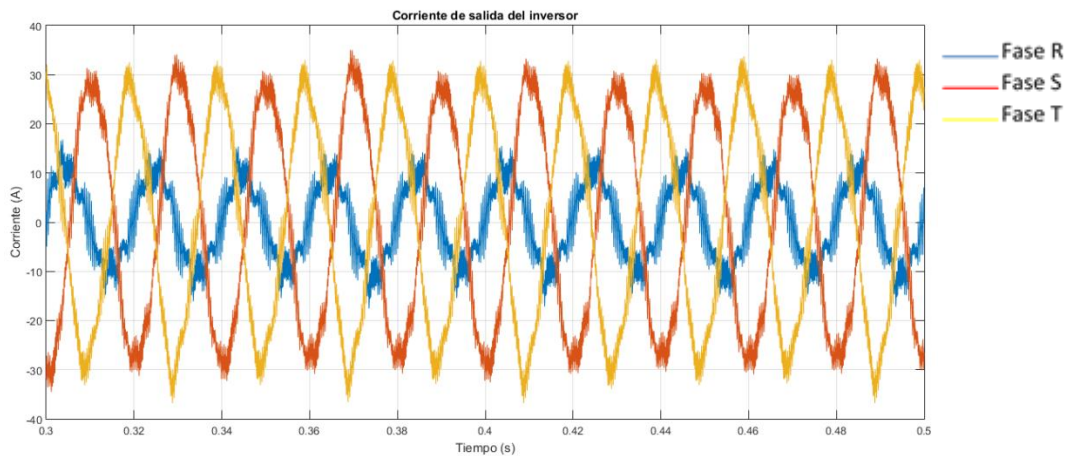


Figura 50: Caso 4. Corrientes trifásicas de salida del inversor

## 6.5 CASO 5: Carga entre una fase y neutro con consumo nulo en las otras dos

Por último, el caso más extremo que puede aparecer es que solo haya una carga conectada en una de las tres fases, mientras que las otras dos se encuentren en circuito abierto. Este caso se ha simulado manteniendo en circuito abierto las fases R y S, y con una resistencia de valor  $10 \Omega$  conectada entre la fase T y el neutro. La potencia demandada por el conjunto de la carga en esta situación será menor, siendo igual a:

$$P = U_{fase} \cdot I_T = U_{fase} \cdot \frac{U_{fase}}{R_T} = 230 \cdot \frac{230}{10} = 5290 \text{ W}$$

En la Figura 51 se puede observar la forma de onda de la única componente de corriente que existe, mientras que en la Figura 52 se observan ya transformadas en sus redes de secuencia.

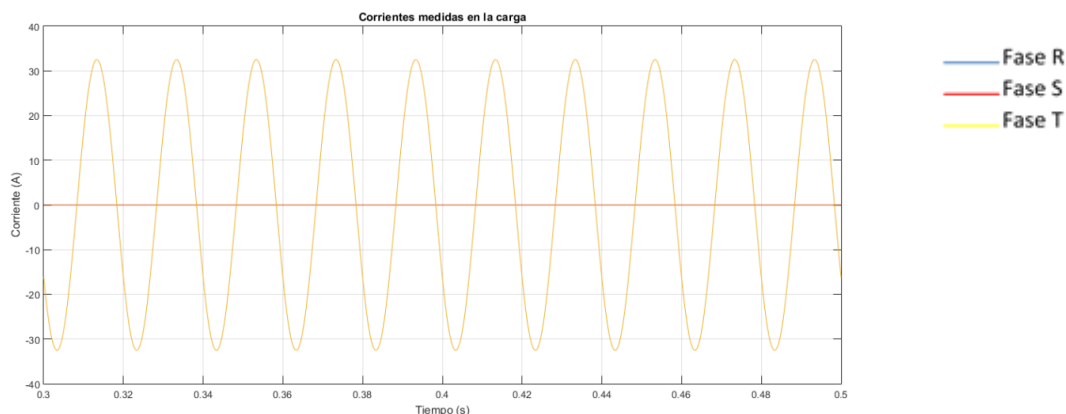


Figura 51: Corriente medida en la carga

Si se observan el resto de casos estudiados, al ser los desequilibrios existentes de menor magnitud, el valor de las componentes de secuencia directa en la carga siempre era mayor al valor de las componentes de secuencia inversa. Este motivo justificó que, en el ajuste de los reguladores de corriente, los que actuaban sobre las componentes directa e inversa tuvieran distinto valor.

Un parámetro fundamental del ajuste es el grado de carga, y el entorno de valores en el que estarán trabajando. Por ello, como habitualmente el nivel de carga de las componentes de secuencia directa iba a ser mayor que el de las de secuencia inversa, los

primeros tenían valores mayores. Se recuerda que los valores utilizados para los reguladores son:

- En las componentes de secuencia directa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 50$
- En las componentes de secuencia inversa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 20$

Sin embargo, al observar el resultado obtenido en la Figura 52, se puede ver como las componentes de secuencia inversa presentan casi el mismo valor que las componentes de secuencia directa, por lo que puede que el ajuste anterior de los reguladores no sea el óptimo.

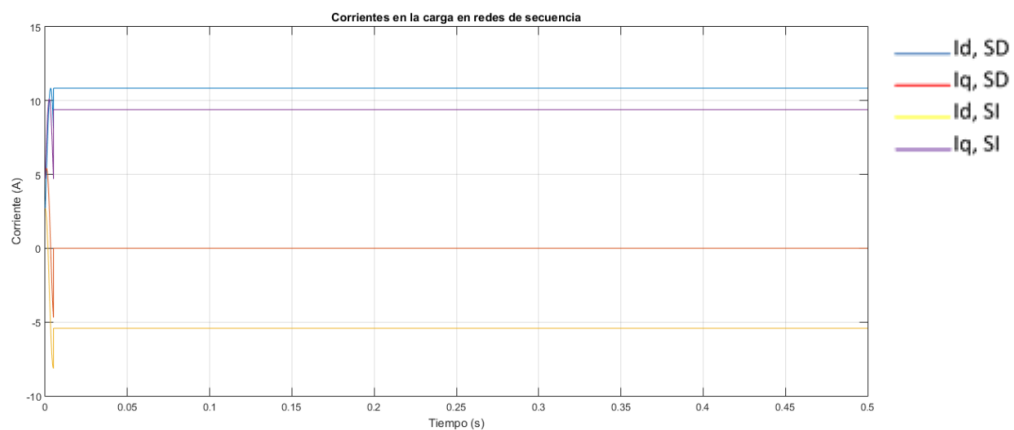


Figura 52: Caso 5. Corrientes en la carga en redes de secuencia

Por ello, va a compararse el valor obtenido entre utilizar los reguladores previos y otra situación, en la que al tener las componentes de secuencia directa e inversa valores similares, se utilizarán para ambos reguladores las mismas constantes, es decir:

- En las componentes de secuencia directa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 50$
- En las componentes de secuencia inversa:  $K_p = 1$  y  $K_i = 50$

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

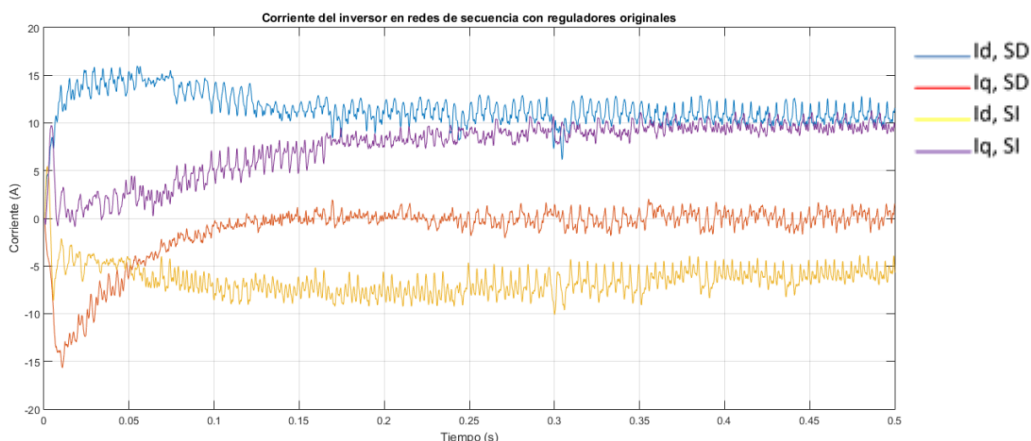


Figura 53: Caso 5. Corrientes en el inversor empleando los reguladores diferentes

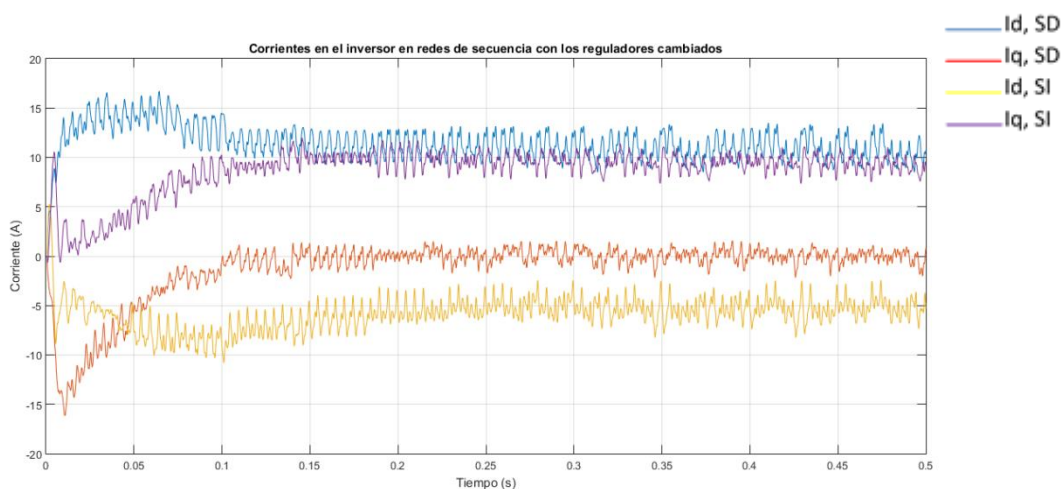


Figura 54: Caso 5. Corrientes en el inversor empleando los mismos reguladores

La Figura 53 representa el caso original, en el que los reguladores para ambas secuencias tienen distintos valores, mientras que en la Figura 54 todos los reguladores tienen los mismos valores. Como se puede observar, en el primer caso, las componentes, y en especial las dos componentes de secuencia inversa, tienen una respuesta más lenta, y tardan más en llegar a sus valores finales en régimen permanente. En el segundo caso, esta respuesta es más rápida. Por tanto, se puede comprobar cómo, ante valores semejantes en el nivel de trabajo, las constantes de los reguladores también deberían presentar valores similares.



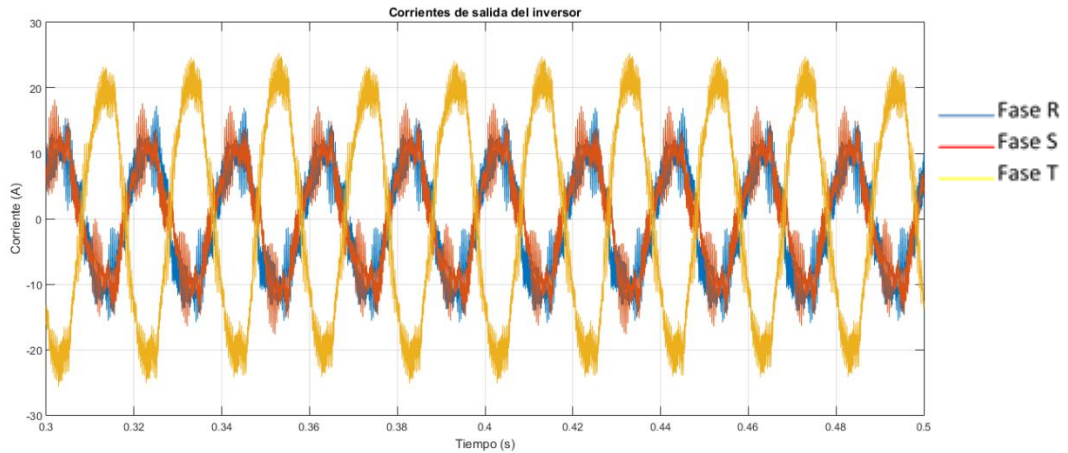


Figura 55: Caso 5. Corrientes trifásicas de salida del inversor

Por último, en la Figura 55 se observan las corrientes trifásicas de salida del inversor, donde, al igual que en el caso anterior, se observa cómo, además de la componente de corriente de la fase T, aparecen dos componentes más pequeñas de las fases R y S y solapadas, que deberán ser absorbidas por la red.

### 6.6 CASO 6: Estudio ante la variación del nivel de carga

Se va a estudiar a continuación la evolución del sistema, y la respuesta del sistema de control del inversor, cuando, tras alcanzar el régimen permanente para un determinado consumo en la carga, éste varía bruscamente. Para ello, se va a modificar el esquema de Simulink de la parte donde se encuentran representadas las cargas según la Figura 56. Se parte de tres cargas iguales en cada una de las fases de valor  $10 \Omega$ . En la fase R se ha colocado en paralelo con ésta una resistencia de valor  $5 \Omega$ , unida a través de un interruptor.

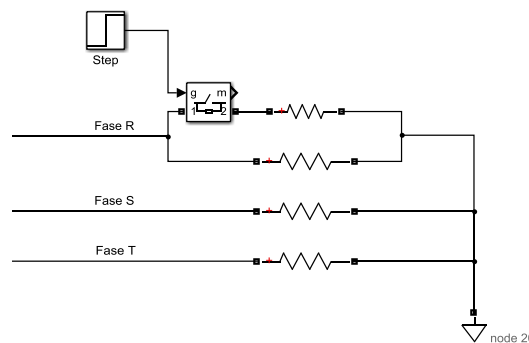


Figura 56: Caso 6. Esquema de Matlab-Simulink para cargas variables

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

El interruptor se ha programado para que comience la simulación abierto y, tras 0,25 s se cierre. Por tanto, durante los primeros instantes de la simulación, el sistema verá a las resistencias como una carga trifásica equilibrada, y una vez que ha alcanzado el régimen permanente, al cerrarse el interruptor, la carga de la fase R pasará a tener un valor distinto, y el conjunto de las tres cargas pasará a ser un sistema desequilibrado. El nuevo valor de la carga en la fase R será:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5}$$

Por tanto,  $R_{tot} = 3,33 \Omega$

En este caso, se ha realizado simulaciones de 1s para asegurar que, tras la variación del nivel de carga, el sistema alcanzaba de nuevo el régimen permanente.

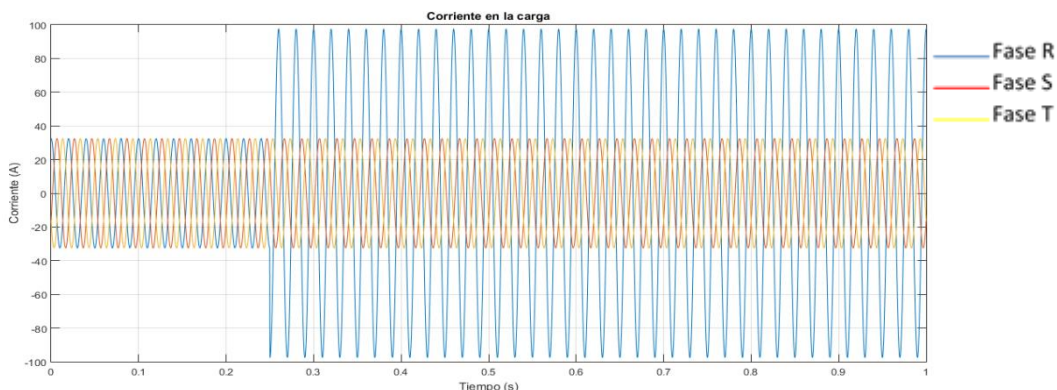


Figura 57: Corriente medida en la carga

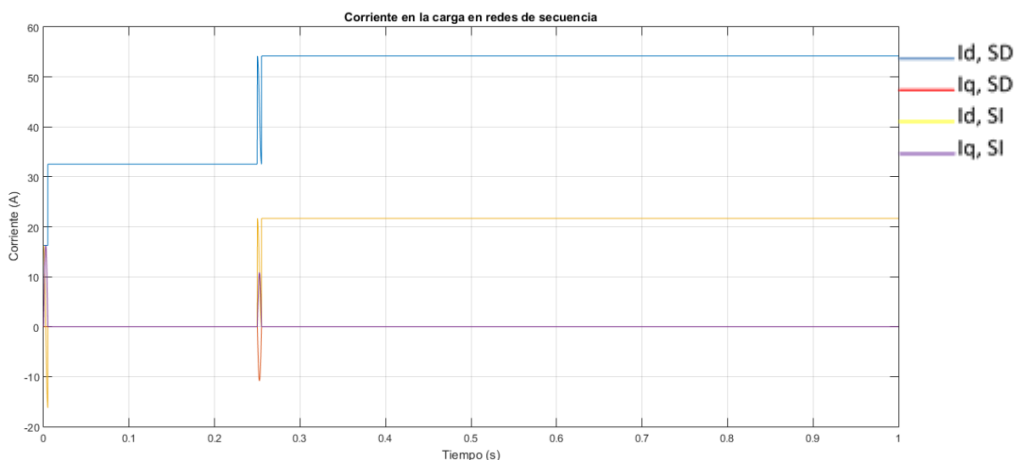


Figura 58: Caso 6. Corriente en la carga en redes de secuencia

Las Figuras 57 y 58 representan la evolución de la corriente en la carga. Se observa cómo, en  $t=0,25$  s, al producirse una disminución en la resistencia equivalente por la fase R, aumenta el consumo de corriente por dicha fase.

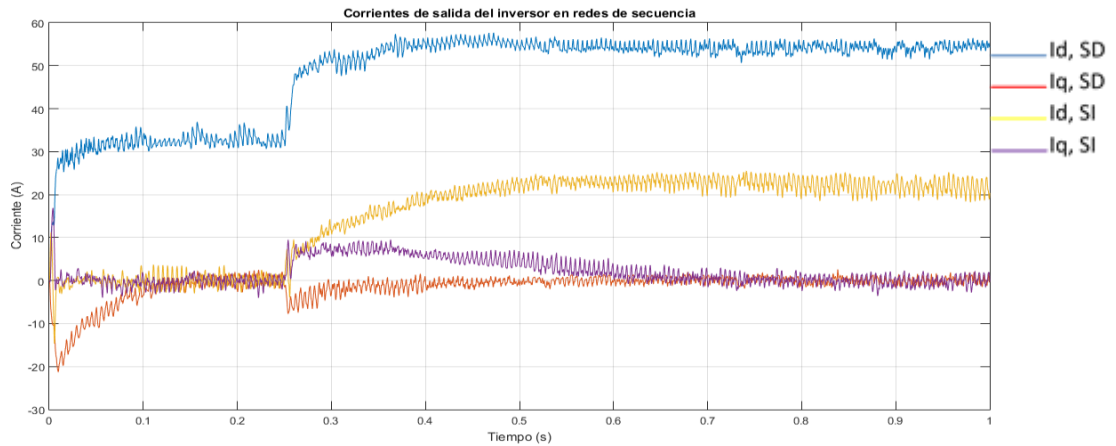


Figura 59: Caso 6. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia

La Figura 60 muestra la evolución de las corrientes de salida del inversor, en sus redes de secuencia. Como se puede observar, las corrientes se estabilizan perfectamente cuando la carga está equilibrada, antes de 0,25 s. Al añadirse la nueva carga, las variables presentan un transitorio que, aunque sí es más largo que el transitorio inicial, todas las variables han alcanzado sus valores de régimen permanente en torno a 0,35 s después de que se produzca el cambio en la carga.

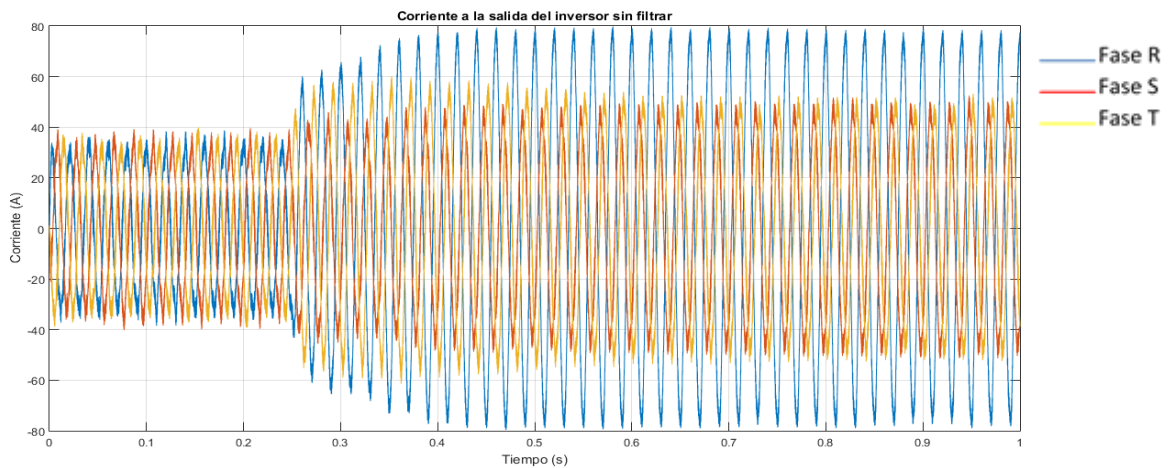


Figura 60: Caso 6. Corrientes de salida del inversor sin filtrar

Además, según se puede observar en la Figura 60, en ninguno de los dos transitorios se produce ningún pico de corriente, si no que las variables van

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

evolucionando de forma suave, por lo que tampoco hay peligro de que se puedan producir daños en los semiconductores o en algún elemento otro elemento del circuito.

Por último, va a presentarse una variante de este caso en el que se producirá la situación contraria: la simulación comenzará con una situación de cargas desequilibradas, y en cierto punto, una vez que las variables ya han alcanzado el equilibrio se añadirá una carga, de forma que ahora el conjunto de las cargas sea visto como un consumo trifásico equilibrado.

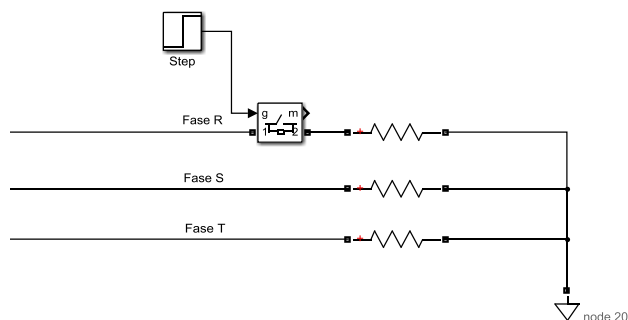


Figura 61: Caso 6b. Esquema de Matlab-Simulink de la representación de las cargas

La Figura 61 muestra el esquema que representará las cargas. En el instante inicial, el interruptor estará abierto, por lo que la fase R se encontrará en circuito abierto, mientras que las fases S y T tendrán cada una de ellas conectada una carga resistiva de 10  $\Omega$ . En  $t=0,4$  s, el interruptor se cerrará, por lo que el circuito de la fase R se cerrará, y al tener también su resistencia un valor de 10  $\Omega$ , el sistema de cargas pasará a ser equilibrado.

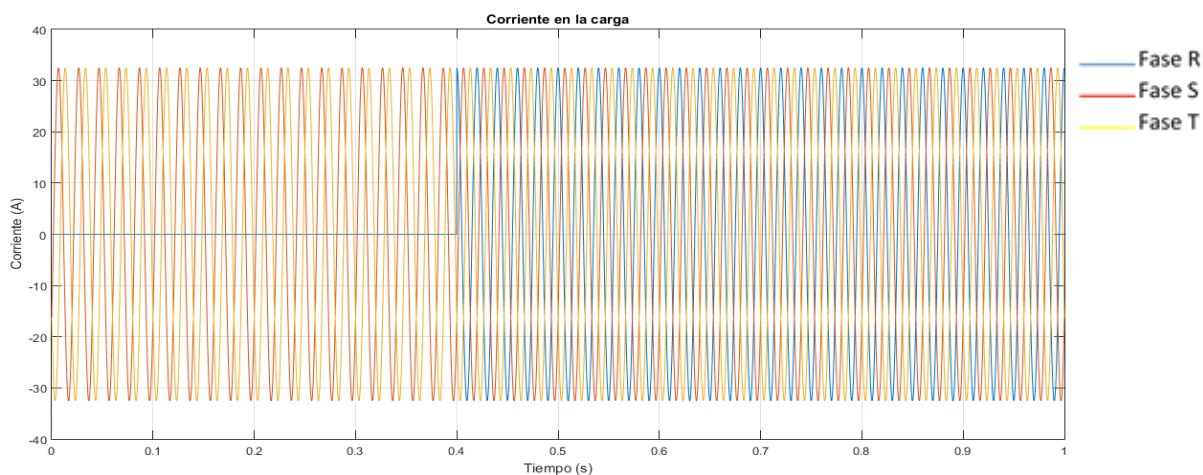


Figura 62: Caso 6b. Corriente de salida de la carga

Esto se puede comprobar en la Figura 62, como a partir de  $t=0,4$  s, las corrientes pasan a ser iguales en cada una de las tres fases.

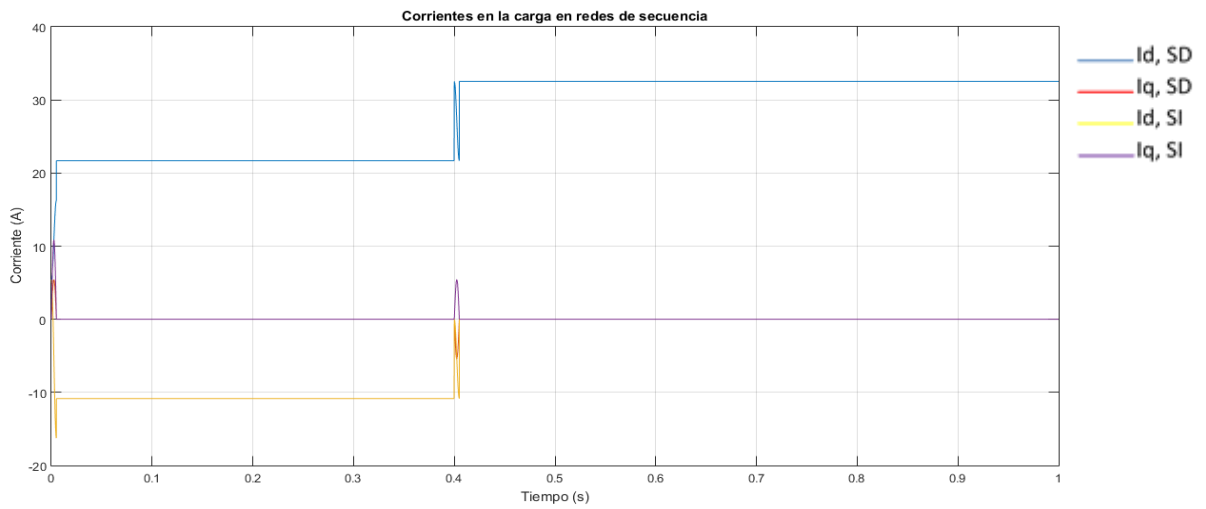


Figura 63: Caso 6b. Evolución de la corriente en la carga en redes de secuencia

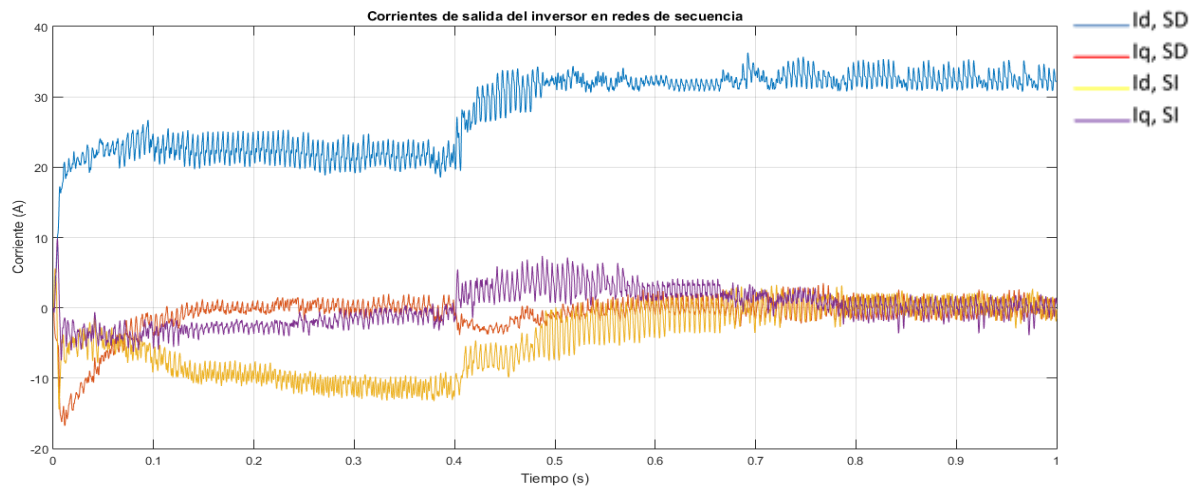


Figura 64: Caso 6b. Evolución de la corriente de salida del inversor en redes de secuencia

A partir de la comparación entre las Figuras 63 y 64, se puede observar como el inversor, a través del control diseñado, consigue sacar las corrientes que demanda la carga en cada momento. En este caso, al realizarse el cambio en los valores de la carga, los valores de la corriente de salida del inversor pasan por un período transitorio que también, al igual que en el caso anterior, es algo más largo que el transitorio inicial, en torno a 0,4 s. Sin embargo, el sistema responde perfectamente a los cambios en los valores de las cargas, y en régimen permanente alcanza el valor final pedido.

Parte 1: Suministro de toda la potencia necesaria a través del convertidor electrónico

Por último, al observar las corrientes de salida del inversor en sus componentes trifásicas, se puede concluir que tampoco se producen sobrecorrientes elevadas por ninguna de las fases a lo largo de los dos transitorios por los que pasa el sistema.

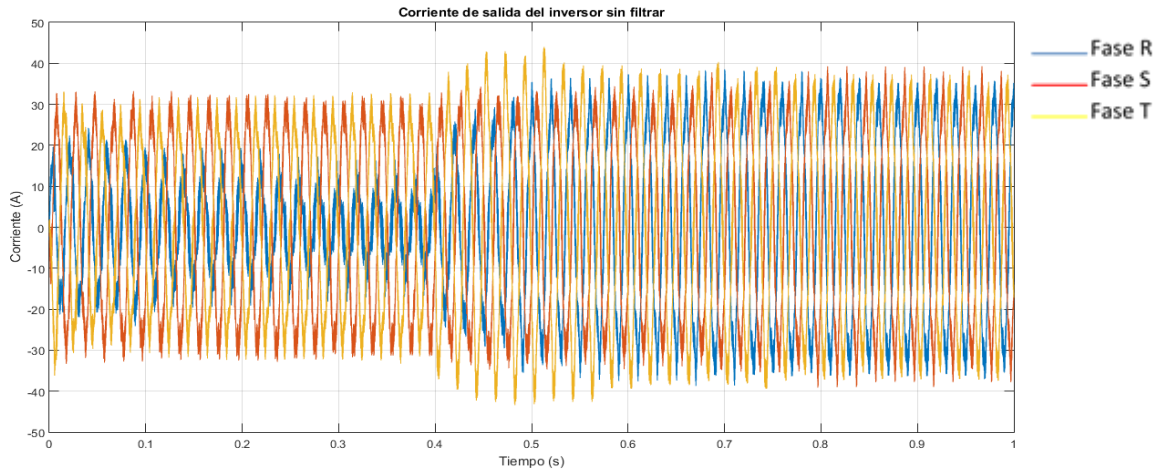


Figura 65: Caso 6b. Corrientes trifásicas de salida del inversor sin filtrar

## 7. PARTE 2: Suministro de potencia por parte de la red y equilibrado de fases por parte del convertidor electrónico

Para esta parte del estudio se analizará la respuesta del sistema de control del inversor diseñado para un nuevo caso. En esta segunda parte, ya no se desea reducir el consumo de red, y que sea el otro sistema generador quien, a través del inversor, de la potencia necesaria a la carga. En este caso se desea que la red sí de potencia, aunque solo de forma equilibrada por cada una de las tres fases, y que sea el convertidor el que se encargue del equilibrado entre las fases, cuando sea necesario.

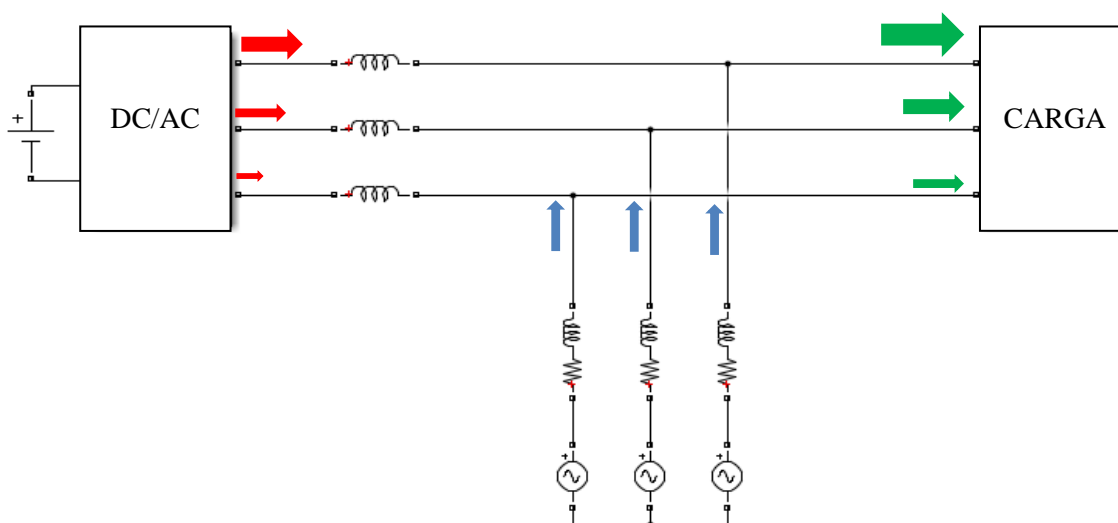


Figura 66: Esquema general de la parte 2 del estudio

El esquema de la Figura 66 muestra una primera aproximación de cómo serán los flujos de potencia entre los distintos elementos que componen el sistema.

Para el diseño de este sistema de control, nos basaremos nuevamente en las redes de secuencia. Como se recuerda, y se puede ver en la Figura 67, cualquier conjunto de tres variables trifásicas desequilibradas puede descomponerse en la suma de tres sistemas trifásicos, dos de ellos sistemas trifásicos equilibrados, cuyas componentes están desfasadas  $120^\circ$  entre sí, y el tercero formado por tres componentes iguales alineadas entre sí. Al no existir la componente homopolar en este sistema, se descompondrá únicamente en sus redes de secuencia directa e inversa.

Parte 2: Suministro de la potencia equilibrada por la red y compensación a través del inversor

La red establece que la secuencia de este sistema es de secuencia directa. Por tanto, las componentes originales y las componentes de secuencia directa giran en el mismo sentido, tal y como se muestra también en la Figura 67. Como se demostró previamente, si el sistema original de corrientes fuera equilibrado, la red de secuencia directa sería igual a ésta, y la red de secuencia inversa tendría sus componentes nulas.

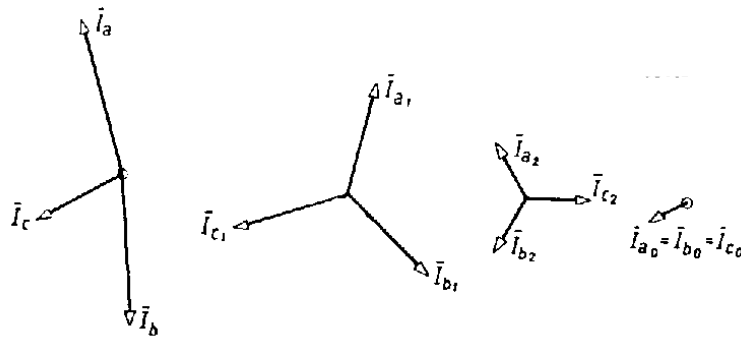


Figura 67: Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en sus redes de secuencia

En este principio se basará el sistema del segundo control. Como se desea que la red aporte potencia de forma equilibrada, la red deberá aportar la corriente equivalente a las componentes de secuencia directa. Por tanto, al inversor le corresponderá aportar las componentes de secuencia inversa de corriente, para que la suma de ambas consiga aportar la potencia desequilibrada demandada por la carga.

Para conseguir esto se debe, en primer lugar, medir las corrientes demandadas por la carga y transformarlas en sus componentes en redes de secuencia:  $I_{d,SD}$ ,  $I_{q,SD}$ ,  $I_{d,SI}$  e  $I_{q,SD}$ . El esquema de potencia se muestra en la Figura 68, y es análogo al empleado para el estudio en el caso 1.

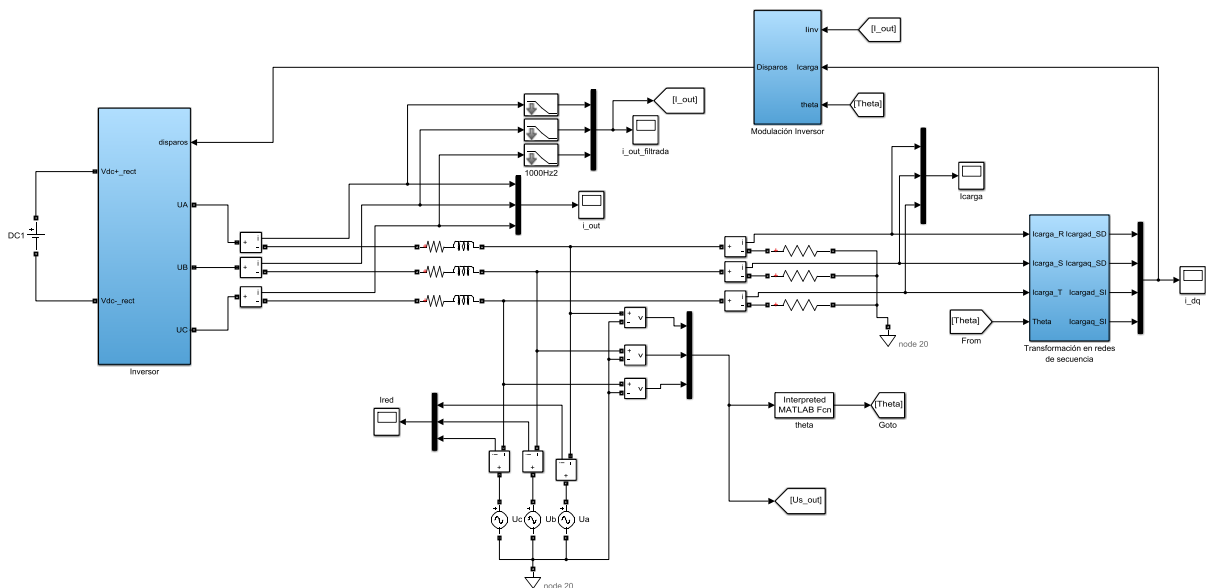


Figura 68: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de potencia



Sin embargo, en el caso anterior, estas cuatro medidas de corriente eran las referencias para el inversor. En este caso, como queremos que solo aporte la parte equivalente a la componente de secuencia inversa, las referencias para el inversor serán:

- $I_{d,SD}^* = 0$
- $I_{q,SD}^* = 0$
- $I_{d,SI}^* = I_{d,SI,carga}$
- $I_{q,SI}^* = I_{q,SI,carga}$

El esquema de control se muestra en la Figura 69. De esta forma, los reguladores actuarán para que el inversor no aporte corriente de secuencia directa y por tanto, tendrá que aportarla la red, que es el objetivo inicialmente deseado.

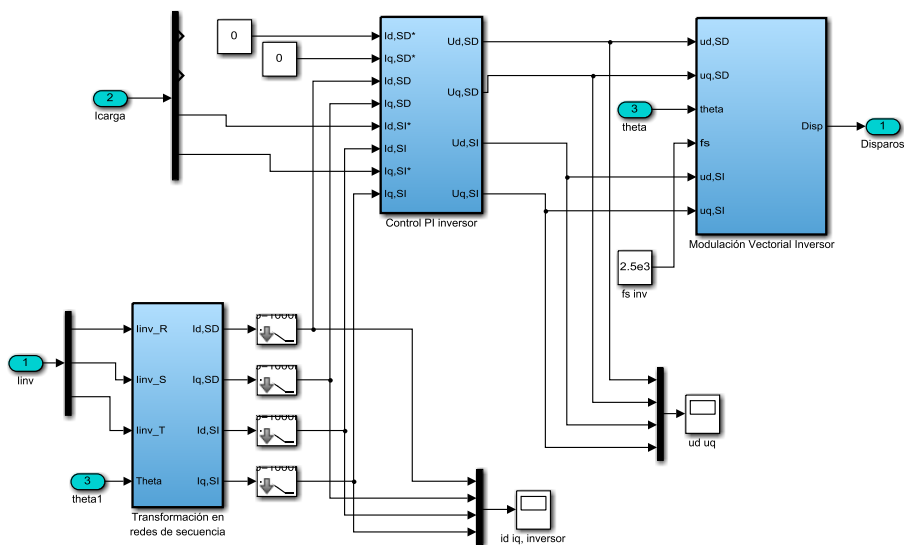


Figura 69: Esquema de Matlab-Simulink del circuito de control

A continuación, se estudiarán distintos casos con diferentes valores de cargas, y se analizarán los resultados obtenidos. Al igual que en la parte 1, todas las simulaciones han sido realizadas con la herramienta *Simulink* de Matlab.

### 7.1 CASO 1: Carga trifásica con el mismo consumo en las tres fases

En este primer caso, se estudiará la evolución de las corrientes si hay tres cargas del mismo valor conectadas, es decir, si la carga tiene un consumo equilibrado. Según el

Parte 2: Suministro de la potencia equilibrada por la red y compensación a través del inversor

razonamiento explicado anteriormente, se pueden prever los resultados que se van a obtener.

Al tratarse de un consumo de corriente equilibrado, al realizar la transformación en redes de secuencia, toda la corriente será igual a la corriente de la red de secuencia directa, mientras que la de secuencia inversa será nula. Esto se puede comprobar en las Figuras 70 y 71.

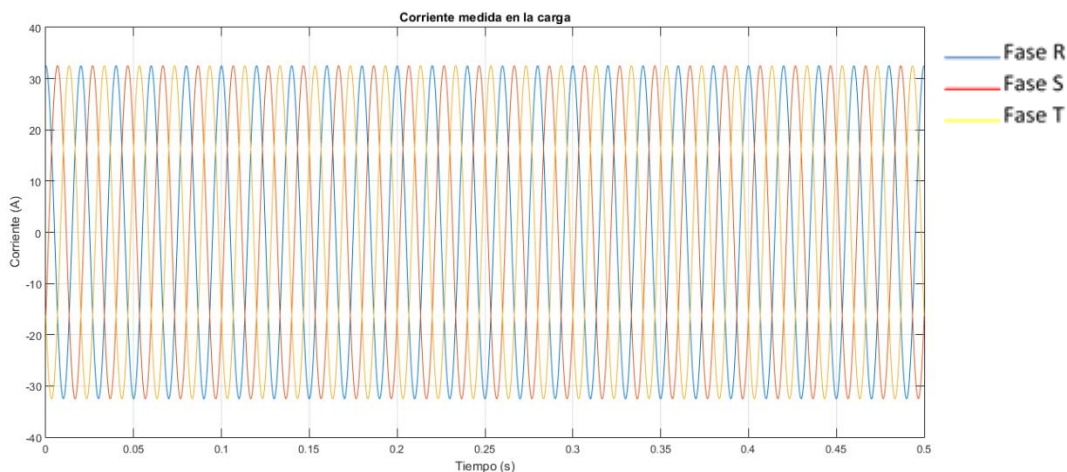


Figura 70: Caso 1. Corriente medida en la carga

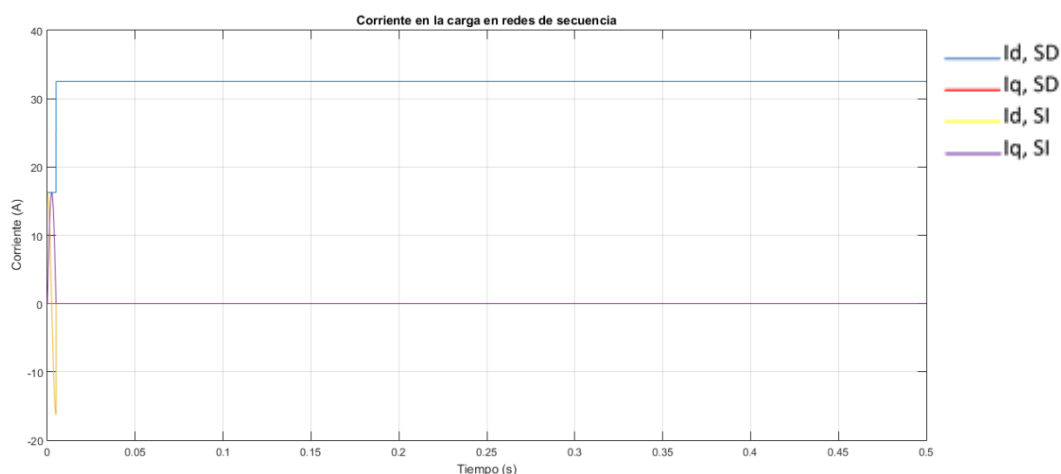


Figura 71: Caso 1. Corriente medida en la carga en redes de secuencia

Como se puede observar, la única componente no nula será la componente  $I_d$  de secuencia directa. Sin embargo, al no ser ésta una referencia para las corrientes del inversor, las cuatro componentes en redes de secuencia para la referencia del inversor serán todas nulas. De esta forma, toda la potencia demandada por la carga será entregada en este caso por la red.

Esto se puede observar en la Figura 72, donde se observa como la corriente de salida de la red coincide con la demandada por la carga. Además, también se observa como durante el transitorio no presenta ningún pico de corriente y evoluciona de manera suave hasta el régimen permanente. Las corrientes de salida del inversor, tal y como se puede ver en la Figura 73, presenta unos valores residuales, debido a los pequeños rizados impuestos por el inversor. También se puede apreciar en la Figura 8 la rapidez del transitorio, ya que alcanza el régimen permanente en torno a 0,1 s.

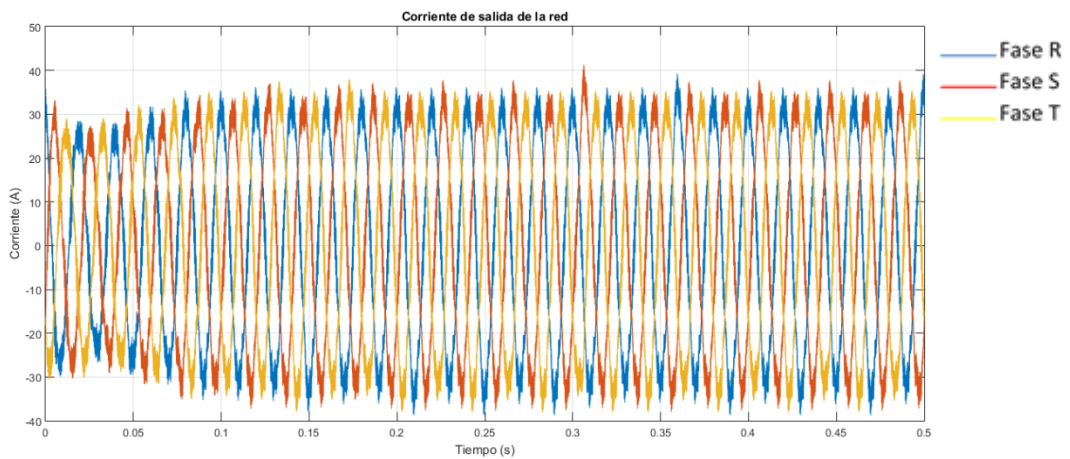


Figura 72: Caso 1. Corriente de salida de la red

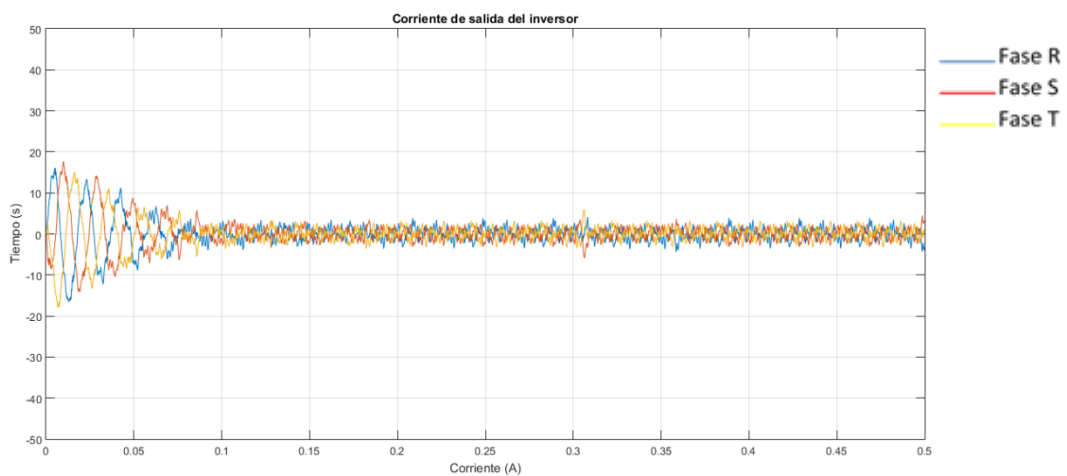


Figura 73: Caso 1. Corriente de salida del inversor

Resulta también interesante comparar los valores de salida obtenidos frente a los que se obtendrían sin utilizar las ecuaciones de desacoplo entre las respectivas componentes  $I_d$  e  $I_q$ . Se recuerdan a continuación dichas ecuaciones de desacoplo, donde  $\omega$  es la velocidad de la red,  $100\pi$  en nuestro caso, y  $L$  el valor del filtro de salida del inversor, que tiene un valor de 3 mH.

$$U_{d,SD} = U_{d,SD}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SD} + U_{red}$$

$$U_{q,SD} = U_{q,SD}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SD}$$

$$U_{d,SI} = U_{d,SI}^* - \omega \cdot L \cdot I_{q,SI}$$

$$U_{q,SI} = U_{q,SI}^* + \omega \cdot L \cdot I_{d,SI}$$

Realizando la simulación sin implementar estas ecuaciones, las tensiones de referencia para la estrategia de modulación del inversor serían directamente las componentes  $U^*$ . La evolución de la corriente de salida de la red se muestra en la Figura 74.

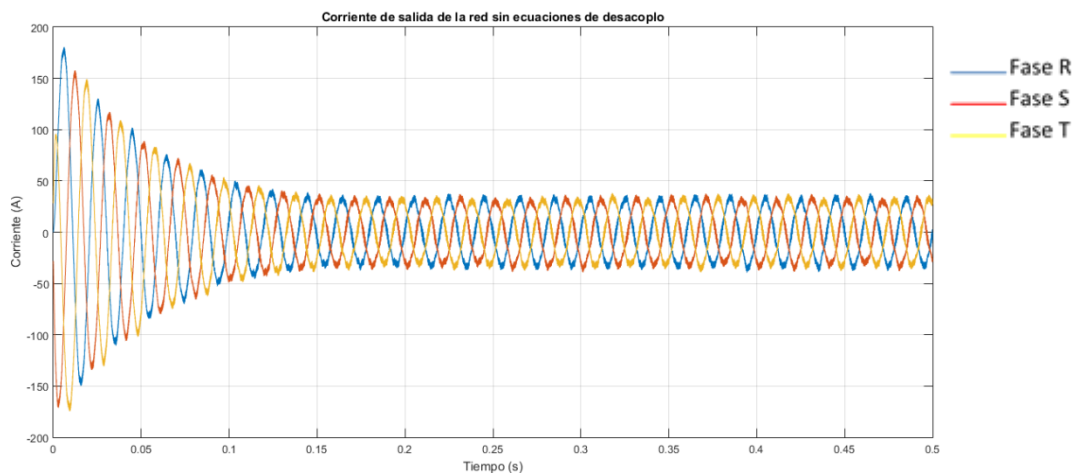


Figura 74: Caso 1. Corrientes en la red sin implementar las ecuaciones de desacoplo

Como se puede observar, presenta un transitorio más acusado, en tiempo, que en el caso de emplear las ecuaciones de desacoplo. Sin embargo, es más importante la magnitud de las corrientes que se alcanzan en los instantes iniciales, que superan los 150 A. Si este proceso transitorio se repitiera de forma continua y hubiera algún dispositivo sensible conectado en la línea, podría sufrir algún daño debido a estos aumentos de corriente. El valor obtenido para la corriente en régimen permanente se corresponde con un sistema trifásico equilibrado de corrientes.

La diferencia en los transitorios mencionada también se puede comprobar observando la evolución de las componentes  $U$  a la salida de los reguladores. Dicha tensión, expresada en las componentes d y q de las redes de secuencia, formará el vector espacial de referencia para la estrategia de modulación empleada.

Como se puede ver en la comparación de la Figura 75, en el caso de que no existan las ecuaciones de desacoplo (imagen de la derecha) la evolución de las componentes del vector tensión es más brusca, lo que provocará variaciones más bruscas también a la salida del inversor, y por tanto, indirectamente, en las corrientes de la red, hasta que el vector tensión alcanza finalmente su valor de equilibrio, en torno a 0,2 s. Sin embargo, en la imagen de la izquierda se observa como la evolución es más suave, ya que las variables parten de un valor más cercano a su valor de régimen permanente, y por tanto, el tiempo necesario para llegar a él también será menor.

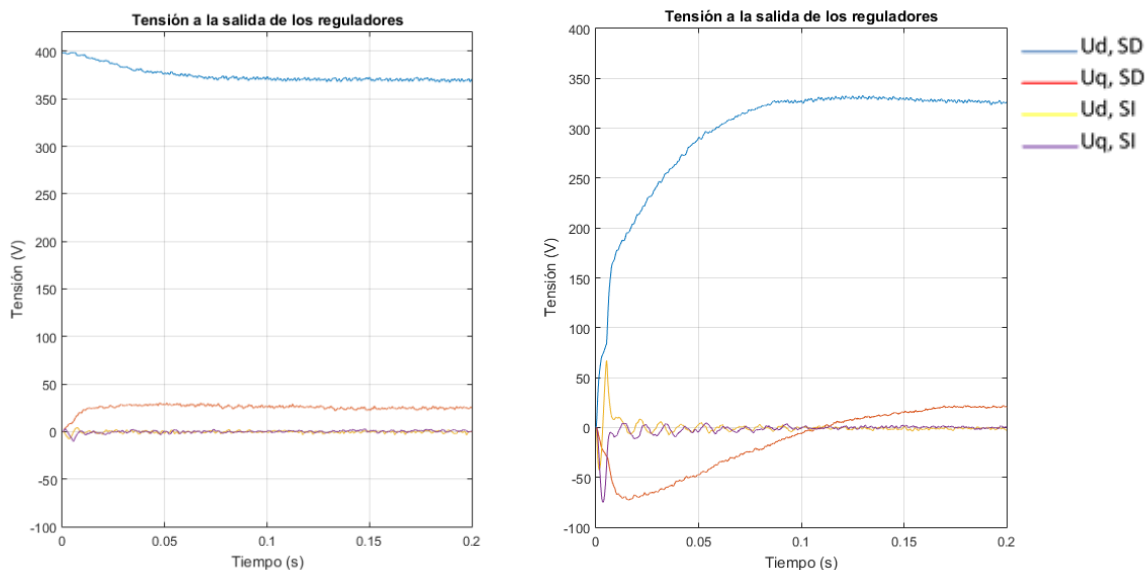


Figura 75: Caso 1. Tensión a la salida de los reguladores con ecuaciones de desacoplo (izquierda) y sin ellas (derecha)

## 7.2CASO 2: Carga trifásica con consumo distinto en una de las tres fases

A continuación, vamos a analizar el primer caso desequilibrado, en el que el consumo por una de las tres fases, la fase R, será menor que el que se producirá por las otras dos. Esto se representará mediante una resistencia de valor  $25 \Omega$  entre la fase R y el neutro, y dos resistencias iguales de  $10 \Omega$  entre las fases S y T y el neutro.

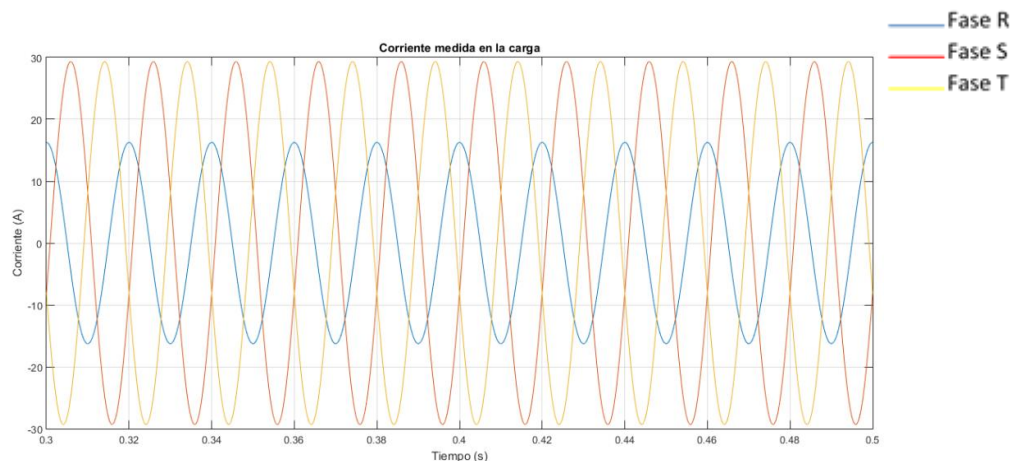


Figura 76: Caso 2. Medida de la corriente en la carga

Se puede comprobar en la Figura 76 como esto sí ocurre, mientras que en la Figura 77 se muestra la transformación de dichas componentes trifásicas en sus componentes en redes de secuencia. En esta segunda parte del estudio, los valores obtenidos de las componentes  $I_{d,SD}$  e  $I_{q,SD}$  no serían necesarios, ya que las únicas referencias necesarias para el inversor son las dos componentes de la red de secuencia inversa,  $I_{d,SI}$  e  $I_{q,SI}$ . Las otras dos referencias del inversor siempre serán nulas.

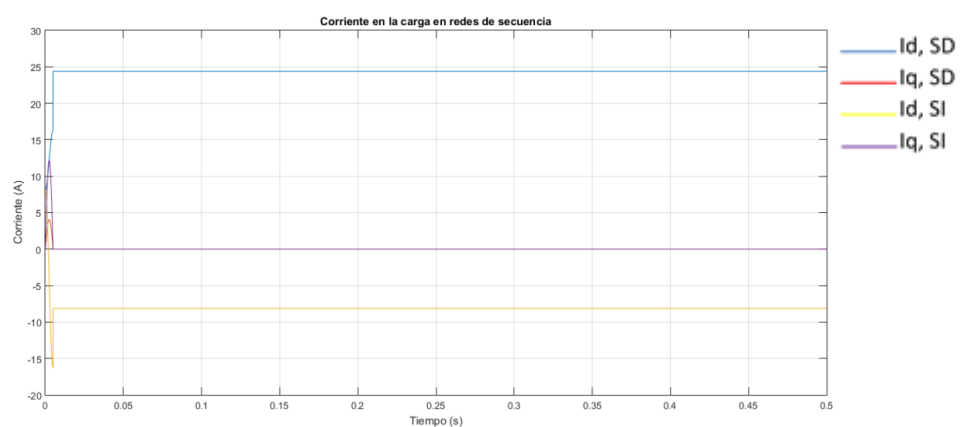


Figura 77: Caso 2. Corriente en la carga en redes de secuencia

Esto se puede comprobar en la Figura 78, que representa las corrientes de salida del inversor expresadas en sus redes de secuencia. Sus dos componentes de secuencia inversa, representadas en color azul y rojo para  $I_{d,SD}$  e  $I_{q,SD}$ , respectivamente, tienden ambas a cero, mientras que las dos componentes de secuencia directa consiguen el mismo valor que sus referencias.

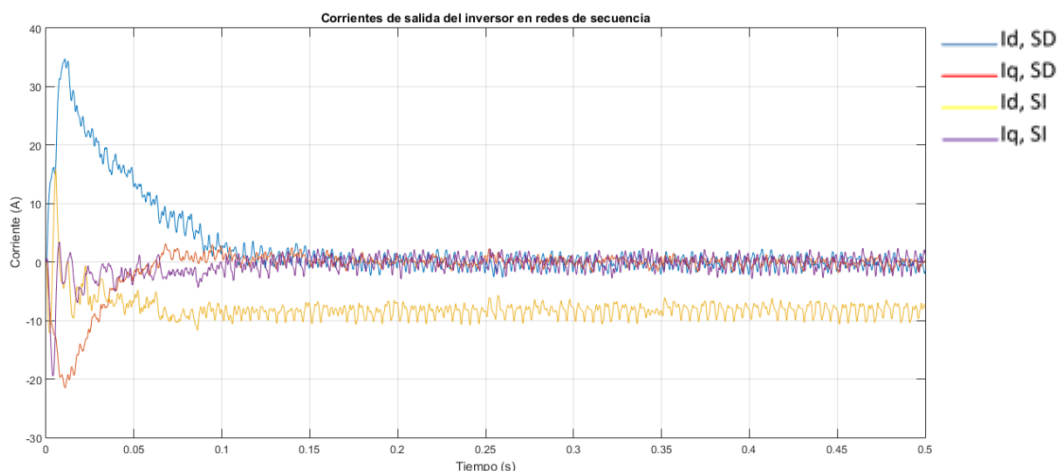


Figura 78: Caso 2. Corrientes de salida del inversor en redes de secuencia

A partir de la estrategia de control diseñada para el inversor, la corriente entregada por la red aparece representada en la Figura 79. Se puede observar, en primer lugar, cómo el periodo de simulación con el que se trabaja (0,5 s) es más que suficiente para representar al sistema una vez que ya se ha establecido en el régimen permanente. Además, durante el periodo transitorio no se producen picos de corriente elevados, si no que los valores de la corriente van aumentando su valor paulatinamente hasta establecerse en el valor final.

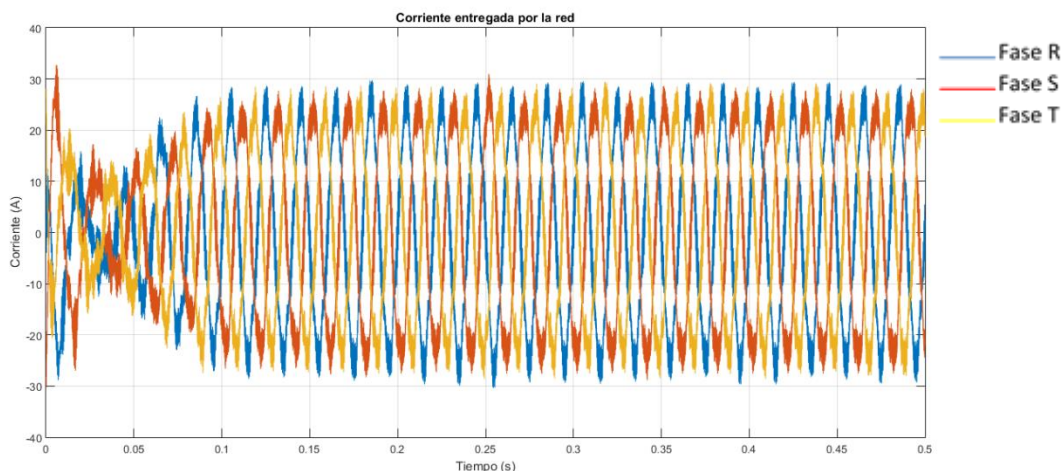


Figura 79: Caso 2. Corriente entregada por la red

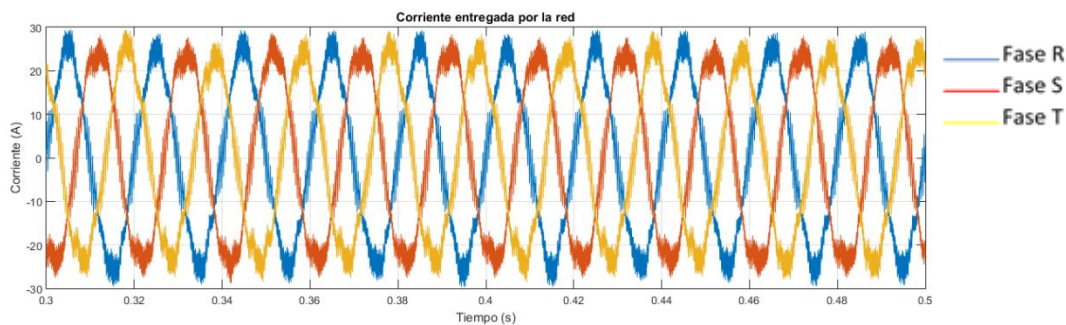


Figura 80: Caso 2. Detalle de la corriente entregada por la red

A partir del detalle de la Figura 80 se puede observar cómo la corriente entregada por la red a la carga forma un sistema trifásico equilibrado de corrientes que alimenta una carga desequilibrada, por lo que está trabajando bien el sistema de control diseñado.

Por último, vamos a analizar la respuesta del sistema ante carga desequilibrada, sin emplear las ecuaciones de desacoplo mencionadas anteriormente. Como se puede observar, sucede algo semejante al caso en el que se encuentra una carga equilibrada. Durante los primeros instantes del transitorio, aparecen corrientes elevadas, pero una vez que se establece el régimen permanente, la corriente de salida de la red tendrá menos variaciones, ya que en este caso no se introducen las pequeñas perturbaciones que provocan las ecuaciones de desacoplo.

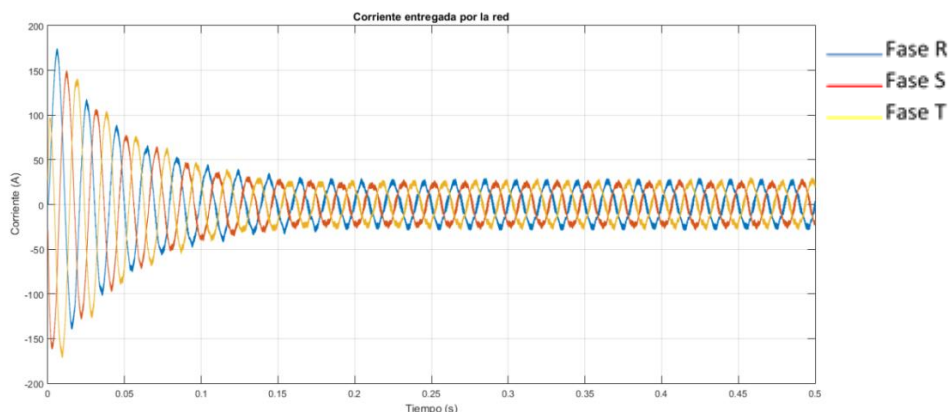


Figura 81: Caso 2. Corriente entregada por la red sin ecuaciones de desacoplo

Sin embargo, sopesando los pros y los contras entre introducir las ecuaciones de desacoplo y no, se considera más importante evitar los picos de corriente elevados durante el transitorio, por los daños que a largo plazo puede provocar en los dispositivos electrónicos, por lo que serán utilizadas en las posteriores simulaciones.



### 7.3 CASO 3: Carga trifásica con consumo distinto en las tres fases

Este caso se analizará más brevemente debido a su similitud con el caso anterior. En este caso, el desequilibrio introducido es mayor, ya que en cada una de las tres fases habrá un consumo diferente, que se representa a través de tres resistencias de distinto valor. La resistencia de la fase R tiene un valor de  $25 \Omega$ , la de la fase S  $10 \Omega$  y por último, la de la fase T valdrá  $5 \Omega$ . Este conjunto es visto exteriormente por el sistema como un consumo trifásico desequilibrado.

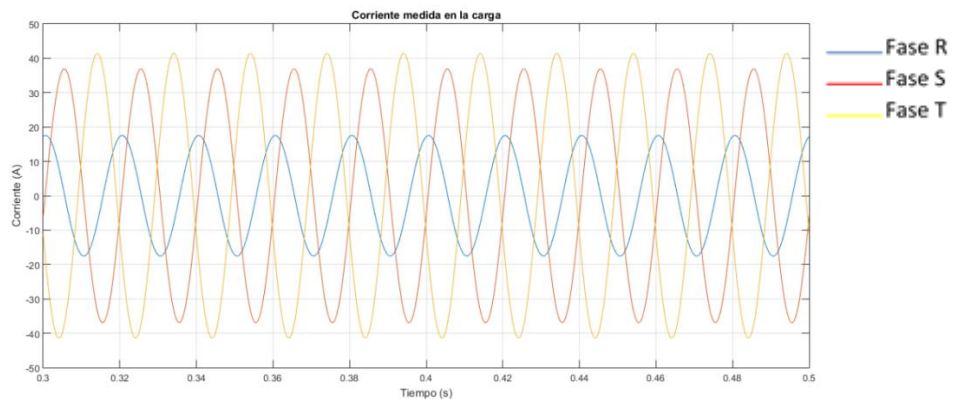


Figura 82: Caso 3. Corriente medida en la carga

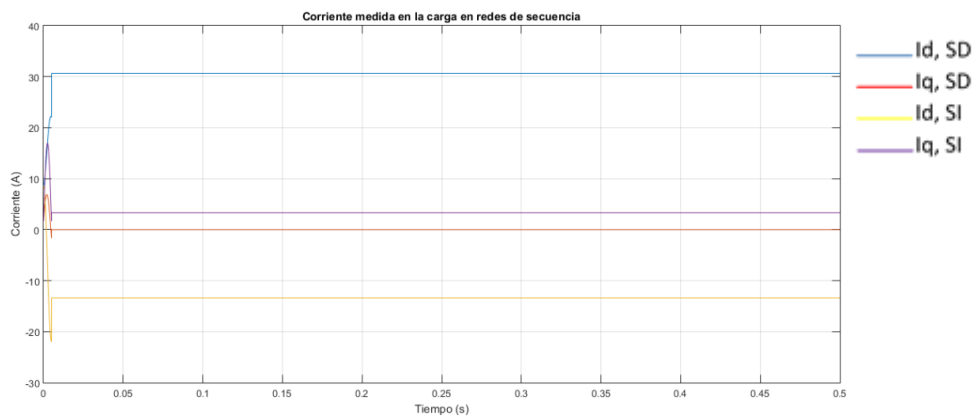


Figura 83: Caso 3. Corriente en la carga en redes de secuencia

Tal desequilibrio se puede comprobar en la Figura 82, y también en la Figura 83, donde las dos componentes de secuencia inversa, representadas en color amarillo y morado presentan un valor distinto de cero. Estos dos valores son las referencias dadas a los reguladores, que, a través de la estrategia de modulación diseñada, generarán en la salida del inversor unas corrientes iguales a las de la referencia.

El resultado de las corrientes inyectadas por el inversor se muestra en la Figura 84. Como se puede observar, las dos componentes de secuencia directa se mantienen en cero, mientras que las dos componentes de secuencia inversa, tras un transitorio de 0,15 s aproximadamente, se establecen en el mismo valor de su referencia. El rizado de estas componentes se debe a la tensión pulsada que genera el inversor, que provoca que las corrientes de salida del inversor también presenten un rizado.

Para intentar mitigar este rizado, se emplea un filtro paso-bajo para filtrar las componentes trifásicas de la corriente de salida del inversor. Sin embargo, para no provocar un retraso demasiado grande de las variables filtradas respecto de las variables originales, se ha empleado una frecuencia de corte alta, de 1000 Hz.

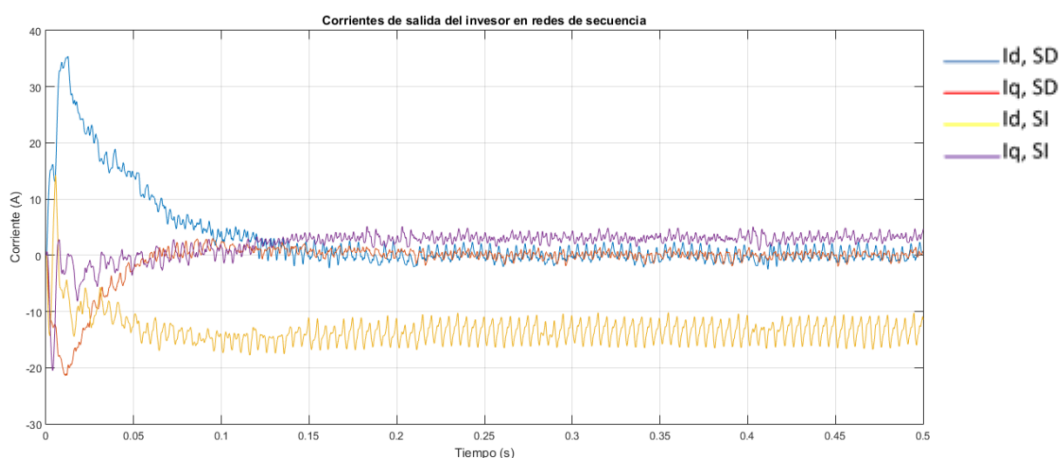


Figura 84: Caso 3. Corriente de salida del inversor en redes de secuencia

Las corrientes de salida del inversor, previas al filtrado, se pueden observar en la Figura 85. Además, también es preciso comentar cómo, al basarse la estrategia de control en la medida de las corrientes de la carga, algunas cargas de poca magnitud como las impedancias de las líneas o los filtros de salida del inversor, no están considerados, por lo que también producen pequeñas variaciones respecto a la corriente ideal de salida.

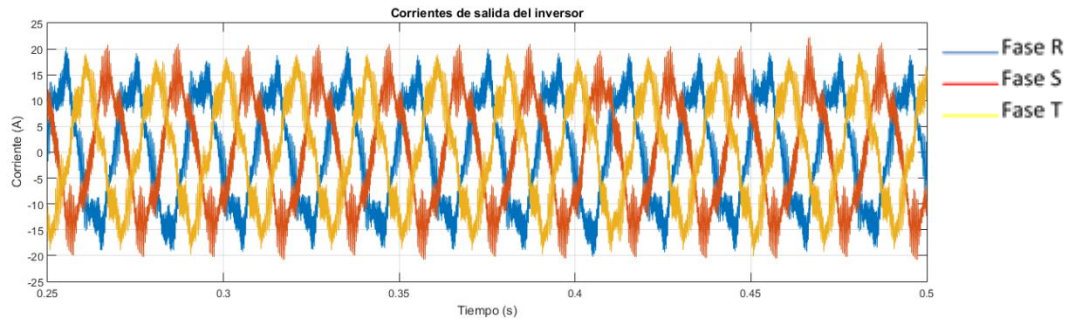


Figura 85: Caso 3. Corrientes trifásicas de salida del inversor sin filtrar

La corriente entregada por la red en este caso se muestra en la Figura 86. Nuevamente, el transitorio es breve y tampoco presenta picos de corriente superiores a la corriente que se establece en régimen permanente.

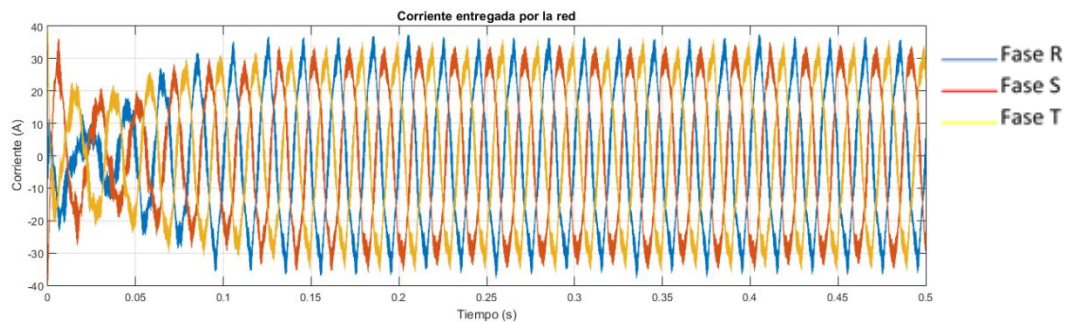


Figura 86: Caso 3. Corriente entregada por la red

En este momento, es preciso recordar el teorema de Fortescue, y a partir del cual se iba basar el esquema de control. Este teorema afirmaba que cualquier sistema trifásico desequilibrado se puede descomponer en tres sistemas trifásicos equilibrados, uno de ellos de secuencia directa, otro de secuencia inversa, y un tercero de secuencia homopolar, que en este caso de estudio sería nulo.

Observando la Figura 82, que representa la medida de la corriente trifásica en la carga, se puede ver que se trata de un sistema desequilibrado de secuencia directa, y que por tanto, el orden de secuencia de las fases indicado en la leyenda será fase R-fase S fase T, equivalente a los colores azul-rojo-amarillo. Este orden es el mismo que siguen las corrientes de salida de la red, tal y como se puede comprobar en la Figura 86, por lo que también se corresponde a un sistema trifásico de secuencia directa.

Sin embargo, en la Figura 85 se observa cómo las componentes de salida de la corriente presentan el orden inverso, es decir, fase S-fase T-fase R, lo que se corresponde con un

sistema trifásico de secuencia inversa. Por tanto, se puede comprobar que el teorema de Fortescue se cumple, y que la suma de dos sistemas trifásicos equilibrados girando en secuencias opuestas constituye un sistema trifásico desequilibrado.

### 7.4 Caso 4: Carga entre dos fases y neutro con consumo nulo en la otra

El siguiente caso que se va a analizar es también un caso desequilibrado, pero a diferencia del anterior, el desequilibrio se debe a que una de las fases, la fase R, no tiene ninguna carga conectada, por lo que se encuentra en circuito abierto. Las cargas en las fases S y T y el neutro son  $10 \Omega$  cada una, lo que hace al conjunto una carga trifásica desequilibrada, como se puede ver en la Figura 87.

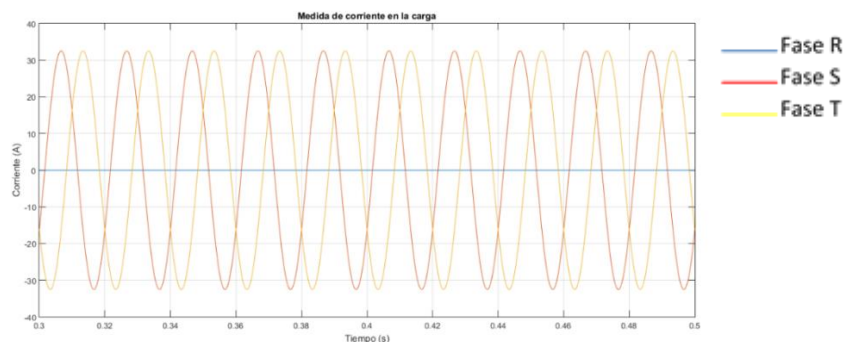


Figura 87: Caso 4. Medida de la corriente en la carga

En la Figura 88 se observa también este desequilibrio a través de las componentes en redes de secuencia, donde las componentes de secuencia inversa presentan un valor distinto de cero, aunque en este caso la única componente no nula será la referida al eje q.

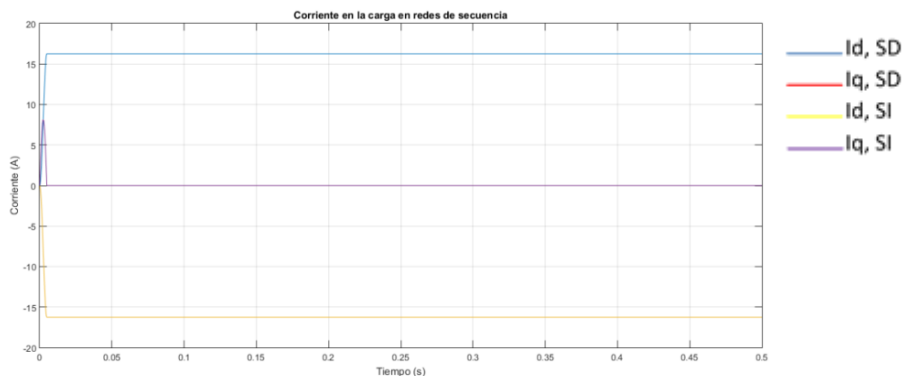


Figura 88: Caso 5. Corriente en la carga en redes de secuencia

Dichas referencias se transforman en las componentes en redes de secuencia de la corriente del inversor, tal y como se observa en la Figura 89. En este caso, presenta un transitorio algo más acusado durante los primeros instantes de la simulación, que rápidamente se estabiliza en sus valores finales antes de  $t=0,15$  s. Las corrientes de salida en sus componentes trifásicas se pueden observar en la Figura 90. Los valores durante los primeros instantes del transitorio no son demasiado elevados, por lo que no hay peligro de que circulen corrientes demasiado elevadas.

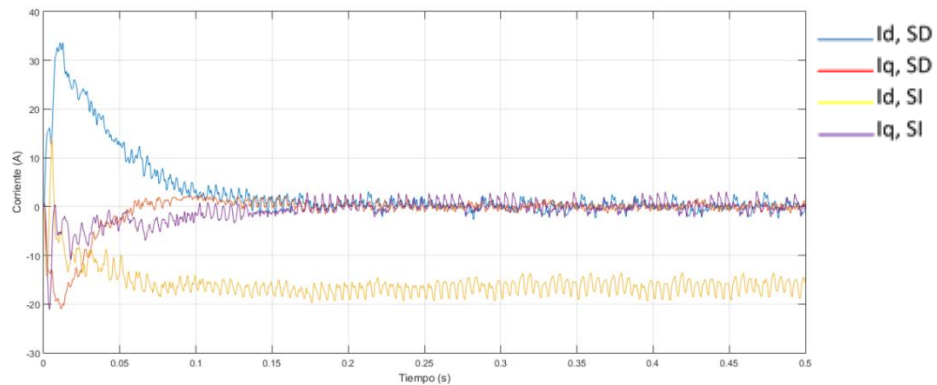


Figura 89: Caso 4. Corriente de salida del inversor en redes de secuencia

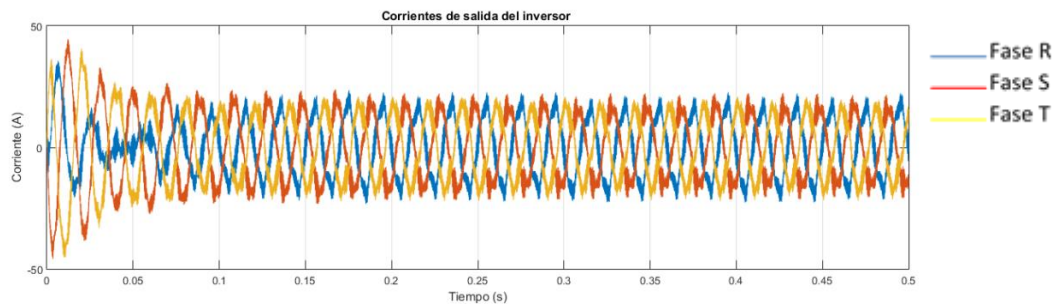


Figura 90: Caso 4. Corrientes trifásicas de salida del inversor

A modo de comparación, se pueden observar en la Figura 91, los valores de la corriente de salida del inversor si no se emplearan las ecuaciones de desacoplo. Se puede comprobar como en este caso, las corrientes durante el transitorio sí que alcanzan valores mucho más grandes.

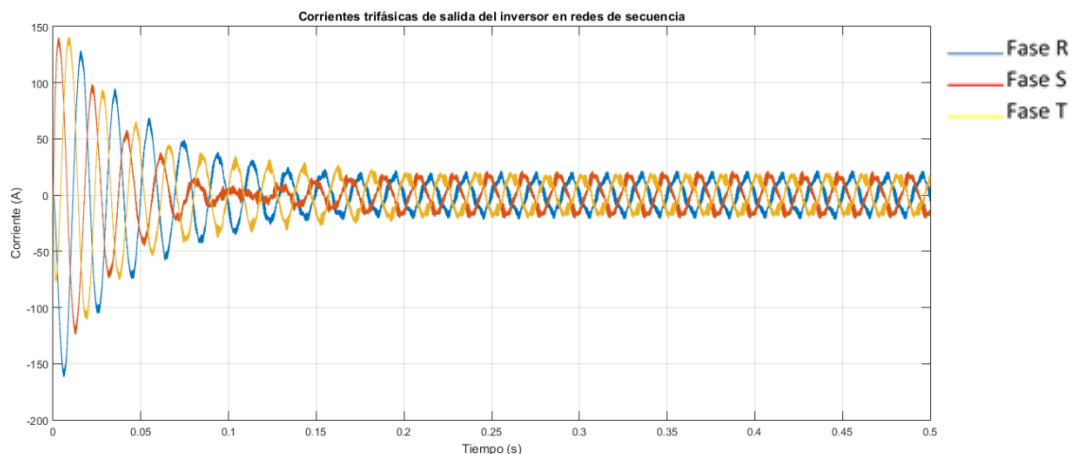


Figura 91: Caso 4. Corriente de salida del inversor trifásicas sin ecuaciones de desacoplo

Por último, se muestra en la Figura 92 el resultado de las corrientes trifásicas entregadas a la carga por la red. Comparando este caso con los anteriores, se puede observar cómo cuanto mayor sea el desequilibrio existente en la carga, tendrán mayor valor las corrientes de secuencia inversa entregadas por el inversor, y menor las corrientes entregadas por la red, aunque ambos sistemas trifásicos equilibrados seguirán sumando el sistema trifásico desequilibrado de corrientes demandado por la carga.

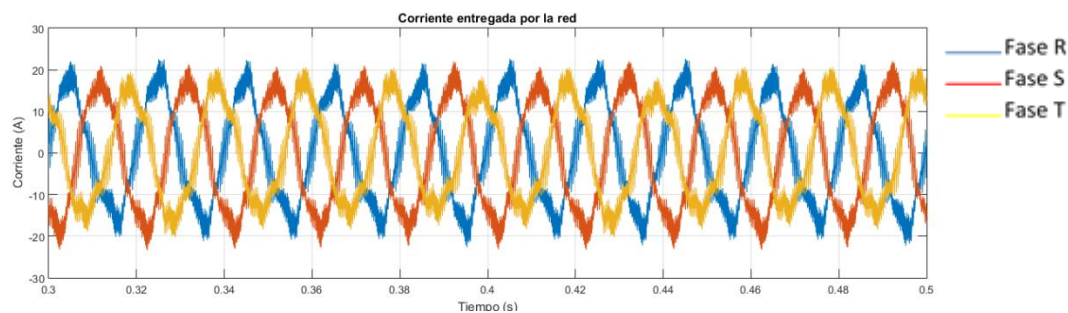


Figura 92: Caso 4. Corriente entregada por la red

## 7.5 CASO 5: Carga entre una fase y neutro con consumo nulo en las otras dos

A continuación, se analizará un caso aún más desequilibrado, en el que únicamente hay una carga conectada en una de las tres fases, mientras que las otras dos se encuentran en circuito abierto. Esto se representará mediante una resistencia de valor  $10\ \Omega$  situada entre la fase T y el neutro, mientras que entre las fases R y S y el neutro no habrá ninguna carga conectada.

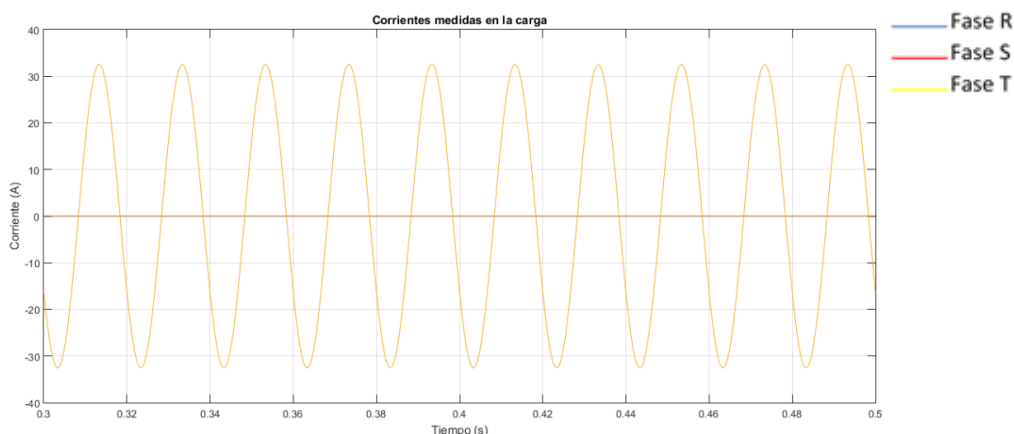


Figura 93: Caso 5. Corrientes medidas en la carga

La existencia del desequilibrio se puede comprobar en la Figura 94, ya que ambas componentes de secuencia inversa,  $I_{d,SI}$  e  $I_{q,SI}$ , presentan valores distintos de cero. Además, se puede comprobar cómo el desequilibrio es grande ya que estas componentes presentan valores casi de la misma magnitud que las de secuencia directa.

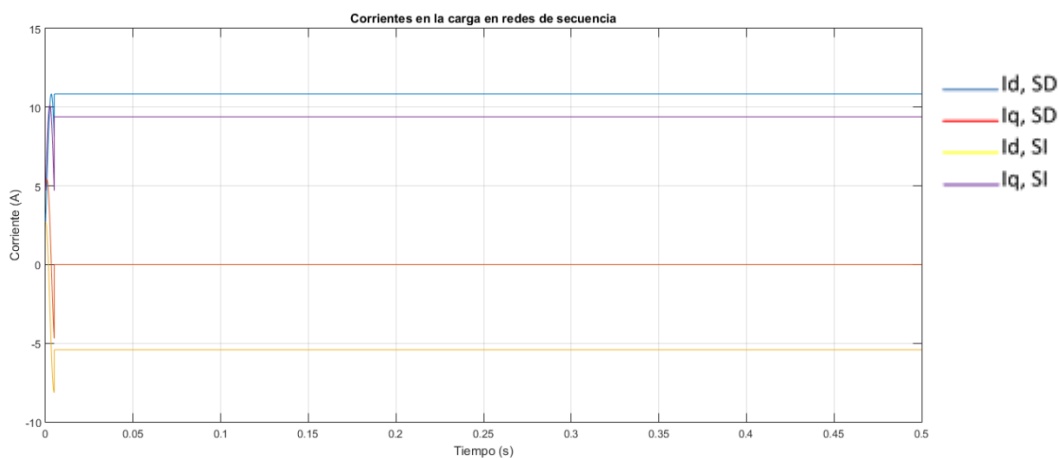


Figura 94: Caso 5. Corrientes en la carga expresadas en redes de secuencia

En la Figura 95 se observa cómo las componentes de secuencia directa del inversor, tras un transitorio de, aproximadamente 0,15 s, se mantienen en cero, por lo que la corriente de secuencia directa será aportada por la red, mientras que las componentes de secuencia inversa,  $I_{d,SI}$  e  $I_{q,SI}$  alcanzan el mismo valor que las componentes de referencia de la carga.

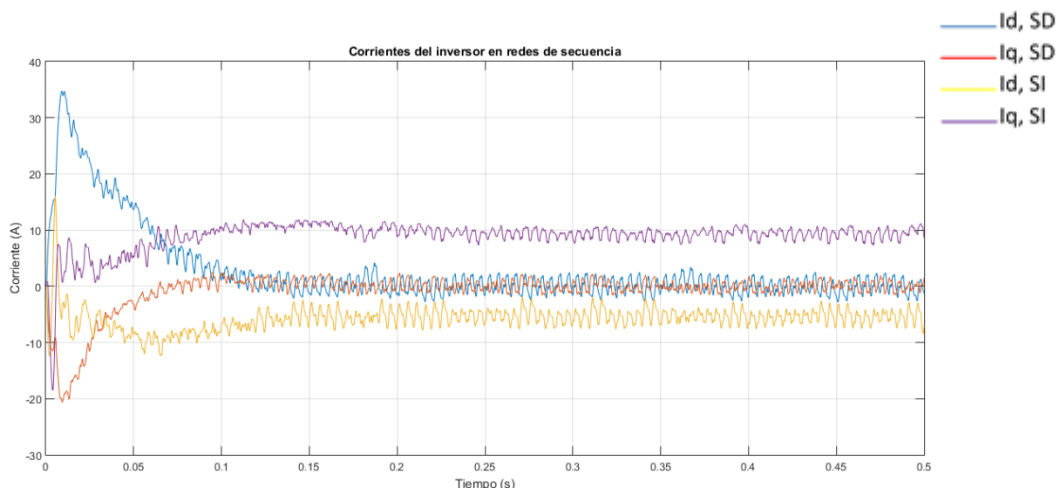


Figura 95: Caso 5. Corrientes entregadas por el inversor en redes de secuencia

## 7.6 Caso 6: Estudio ante la variación del nivel de carga

Por último, se estudiará un último caso en el que, tras establecerse el sistema en régimen permanente para un determinado nivel de carga, se añadirá una nueva carga y se estudiará la evolución del sistema hasta ese nuevo estado. En este caso, se partirá de una situación equilibrada, donde habrá tres cargas iguales en cada una de las fases, de  $10 \Omega$  cada una. Tras un tiempo de simulación de  $t=0,4$  s, el interruptor de la Figura 96 se cerrará, y se añadirá en paralelo con la resistencia de la fase R una nueva resistencia, de valor  $5 \Omega$ , por lo que la nueva impedancia de la fase R será:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5}$$

Por tanto,  $R_{tot} = 3,33 \Omega$ . El conjunto de cargas ocasionará ahora un consumo desequilibrado.



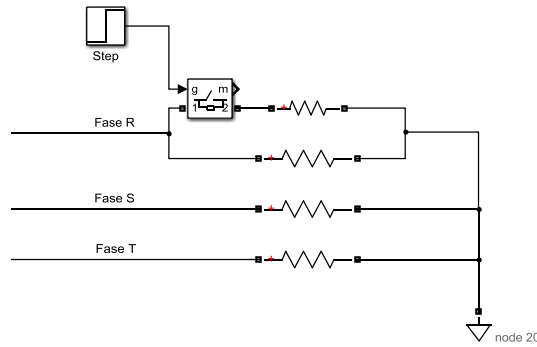


Figura 96: Caso 6. Esquema de Matlab-Simulink para cargas variables

Este desequilibrio se puede observar en la Figura 97 ya que hasta  $t=0,4$  s, la única componente no nula del consumo medido en la carga pertenecía a la red de secuencia directa mientras que, cuando se produce el cambio en el nivel de carga, la componente  $I_a$  de secuencia inversa también toma un valor distinto de cero.

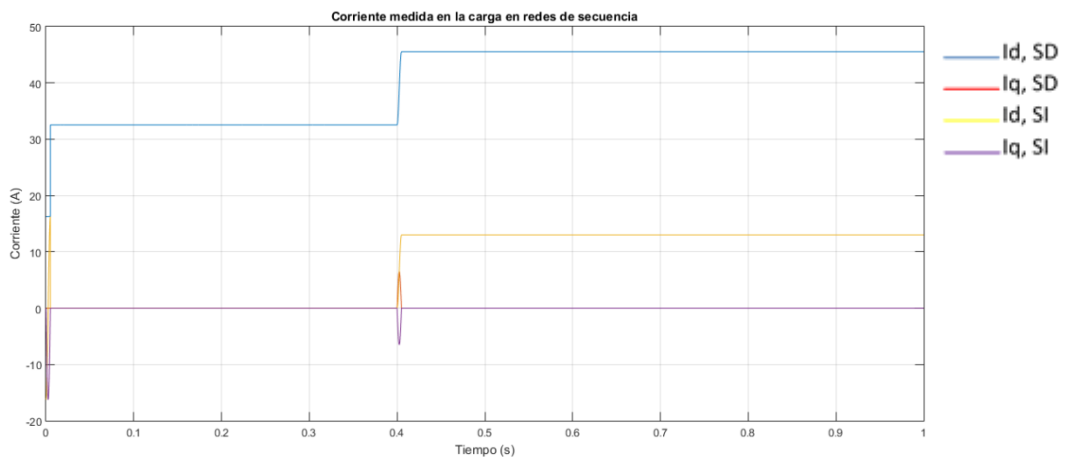


Figura 97: Caso 6. Medida de corrientes en la carga en redes de secuencia

En cuanto a la evolución de las corrientes inyectadas por el inversor, según el control diseñado, durante el primer período todas sus componentes deberían ser nulas, ya que, al tratarse de un sistema equilibrado, toda la potencia debería ser aportada por la red. Una vez que se introduce la nueva carga en paralelo con la fase R, se produce el desequilibrio y, como se observa en la Figura 98, el inversor pasa a entregar potencia. Para ello, pasa por un breve transitorio, pero en torno a 0,1 s después de que se inicie el transitorio, las variables ya han alcanzado su nuevo valor final.

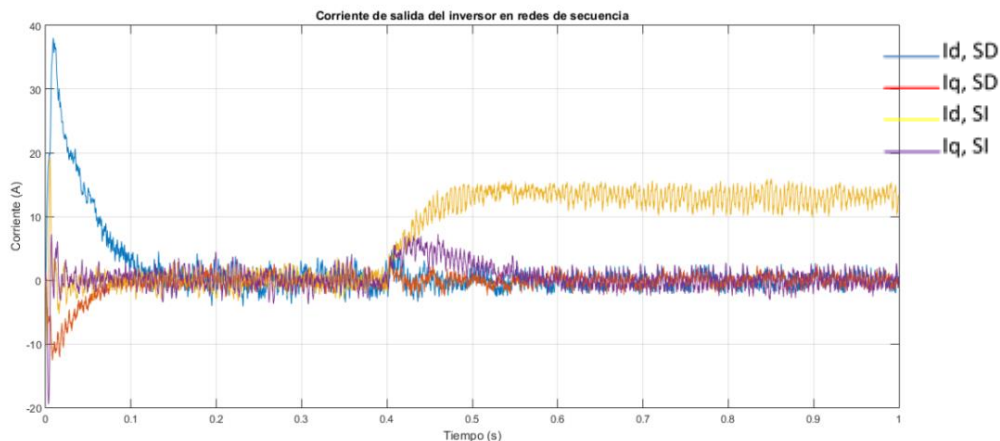


Figura 98: Caso 6. Corrientes del inversor en redes de secuencia

Dichas corrientes entregadas durante el segundo período se muestran en la Figura 99. Como se puede observar, se trata de un sistema trifásico equilibrado de corrientes en secuencia inversa, la secuencia opuesta a la de la carga desequilibrada; mientras que la corriente consumida de la red, presenta una secuencia directa de fases, como se puede comprobar en la Figura 100.

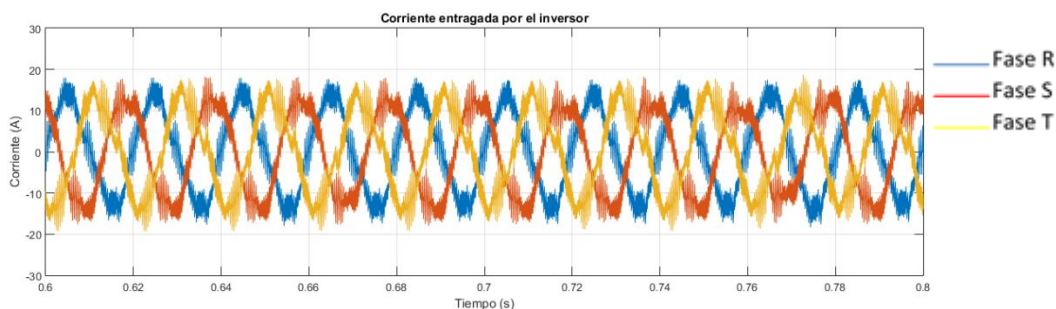


Figura 99: Caso 6. Corriente entregada por el inversor

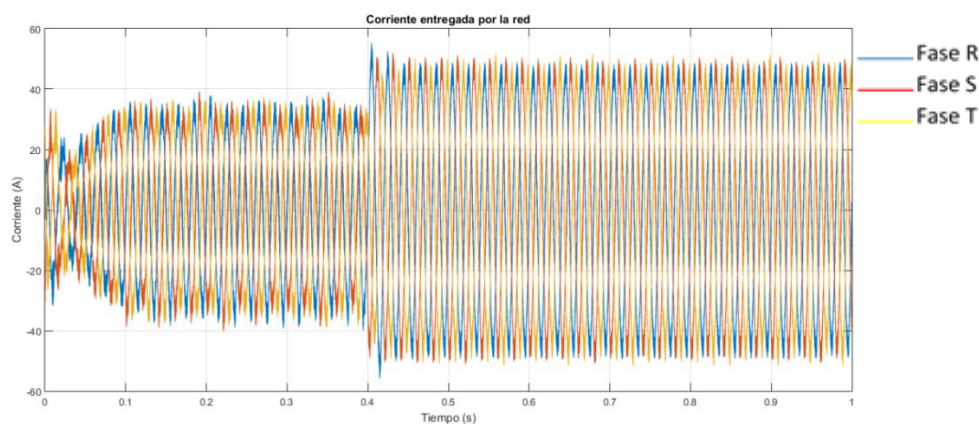


Figura 100: Caso 6. Corriente entregada por la red

## 8. Conclusiones del estudio

A lo largo de los dos capítulos anteriores, se han mostrado y analizado los resultados obtenidos al simular, con distintos consumos de la carga, el funcionamiento del modelo diseñado. Se han analizado con dos planteamientos diferentes: en la parte 1 el objetivo era reducir al máximo el consumo de la red, y que toda la corriente demandada por la carga fuera aportada, a través del inversor, por un sistema alternativo de generación en corriente continua. La parte 2, por su parte, se diseñó para que la red aportara potencia a la carga de forma equilibrada, y el convertidor electrónico de potencia se encargara únicamente del equilibrado entre las fases.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden obtener varias conclusiones comunes en cuanto a la estructura del modelo diseñado:

- Las constantes de los reguladores de corriente se establecen para que trabajen óptimamente para un determinado nivel de carga. Al variar mucho los valores de las cargas conectadas al modelo, también varían los valores en torno a los cuales trabajarán los reguladores. Cuando se alejan mucho de sus valores de diseño, su rendimiento disminuye y la respuesta se vuelve más lenta, aunque en todos los casos consiguen eliminar el error en régimen permanente.
- Las ecuaciones de desacoplo implementadas a la salida de los reguladores de corriente, que permiten eliminar el desacoplo entre las componentes  $I_d$  e  $I_q$  para cada una de las dos redes de secuencia, en todos los casos reducen el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el régimen permanente y también reducen los valores de los picos de corriente durante el transitorio. Sin embargo, a cambio de eso, introduce pequeñas oscilaciones en régimen permanente debido al término  $\pm \omega \cdot L \cdot I_i$ , siendo  $I_i$  el término opuesto de corriente.
- Las corrientes de salida del inversor presentan una gran cantidad de armónicos de alta frecuencia debido al propio funcionamiento del inversor, ya que gracias a la apertura y el cierre de interruptores a frecuencias elevadas (a 2,5 kHz en este modelo) se genera en la salida una señal de tensión cuadrada y pulsada, cuyos extremos son el valor de la tensión en el bus de continua. Estas corrientes de salida obtenidas podrían filtrarse con un filtro paso-bajo de frecuencia de corte baja, pero al retrasar mucho la onda filtrada respecto de la original, se perdería rapidez en la respuesta. Por tanto, se optará por una frecuencia de corte más elevada, de 1000 Hz.

A continuación, se comentarán las principales conclusiones particulares para cada una de las dos partes del estudio.

## 8.1 Conclusiones de la parte 1

En general, la respuesta del sistema de control diseñado es buena: las componentes en redes de secuencia del inversor alcanzan el valor marcado por la referencia en cada caso, que posteriormente se transforman en las componentes trifásicas de alimentarán a la carga.

Al medir el consumo de corriente realizado por la carga, y que sea ésta la referencia para obtener las corrientes de salida del inversor, otros pequeños consumos, como los de la impedancia de las líneas o los filtros de salida del inversor, no están considerados, por lo que en todos los casos esa pequeña corriente necesaria deberá ser aportada por la red.

Además, en los casos en los que una o más fases de la carga se encuentran en circuito abierto, el inversor saca por la salida de esas fases una pequeña corriente, que debe ser absorbida por la red, ya que la carga no puede recibir corriente por dichas fases.

En los casos en los que la carga es variable y, tras establecerse los valores de las corrientes de salida del inversor, se produce un nuevo cambio en la carga, el segundo transitorio que aparece es más largo que el inicial. Sin embargo, en los casos estudiados, el sistema sí es capaz de llevar a las corrientes de salida del inversor al nuevo nivel de carga pedido.

## 8.2 Conclusiones de la parte 2

En cuanto a resultados obtenidos para las simulaciones de la segunda parte, se observa cómo los transitorios que se producen durante los instantes iniciales hasta alcanzar el régimen permanente presentan unos valores de corriente superiores a los que aparecen en las simulaciones de la parte 1. En cualquier caso, no son demasiado elevados y siempre son inferiores a los que se obtendrían sin utilizar las ecuaciones de desacoplo.

La estrategia de control diseñada consigue que las corrientes desequilibradas demandadas por la carga sean suministradas de forma equilibrada por la red, logrando el objetivo deseado, mientras que el equilibrio entre las fases se logra a partir del sistema de secuencia inversa suministrado por el inversor.



## 9. Líneas futuras de trabajo

En cuanto a trabajos futuros o mejoras que se puedan realizar en el sistema ya diseñado, se pueden comentar dos:

- En cuanto al ajuste de los reguladores PI de corriente, se llegó a la conclusión de que, para una determinada pareja de valores de las constantes  $K_p$  y  $K_i$ , su funcionamiento era óptimo para un determinado rango de trabajo. Al alejarse de ese entorno de valores, su eficiencia disminuía, y la respuesta se volvía más lenta hasta alcanzar el régimen permanente.

El diseño de unos reguladores cuyas constantes fueran variables con el nivel de carga del sistema, haría que estos trabajaran con un rendimiento más elevado en un rango de valores mucho mayor.

- Otro lazo de control exterior que se puede establecer es la regulación de la tensión en el bus de continua, a la entrada del inversor, si en vez de hacer una fuente hubiera, por ejemplo, un condensador. A partir del valor de tensión continua deseado, la referencia, un nuevo regulador PI exterior indicaría las consignas de corriente necesarias para conseguir el valor de tensión de referencia.





## 10. Planificación

La realización de este Trabajo Fin de Grado se ha realizado a tiempo parcial durante los últimos 12 meses, desde febrero de 2016 hasta febrero de 2017, compaginándose desde febrero hasta junio de 2016 con la finalización de los estudios del grado, y de septiembre de 2016 a febrero de 2017 con los estudios del Máster en Ingeniería Industrial, en esta misma Escuela.

Por tanto, el reparto de la carga de trabajo a lo largo de estos meses ha estado en parte condicionado por el nivel de trabajo exigido en cada momento por las asignaturas cursadas, como se puede ver, por ejemplo, en los períodos de exámenes, donde se ha dedicado el tiempo de trabajo disponible al estudio de estos.

<i>Nombre de la tarea</i>	<i>Fecha de inicio</i>	<i>Fecha de fin</i>
<b>Reunión inicial para la decisión del tema del proyecto</b>	23/11/2015	23/11/2015
<b>Descarga e instalación de la versión de Matlab necesaria</b>	27/11/2015	27/11/2015
<b>Repaso teórico previo sobre los contenidos a utilizar posteriormente</b>	08/02/2016	12/02/2016
<b>Trabajo con el modelo de Matlab-Simulink sin redes de secuencia</b>	01/03/2016	13/05/2016
Regulación del control a partir de las corrientes medidas en la carga	01/03/2016	04/04/2016
Regulación del control a partir de las corrientes medidas en la red	11/04/2016	13/05/2016
<b>Trabajo con el modelo de Matlab-Simulink con redes de secuencia</b>	03/10/2016	02/01/2017
Diseño de la separación en redes de secuencia	03/10/2016	11/10/2016
Ajuste de los reguladores de corriente	14/10/2016	28/10/2016
Implementación estrategia de modulación	31/10/2016	23/11/2016
Realización de las simulaciones parte 1	28/11/2016	01/12/2016
Realización del modelo de Simulink para la parte 2	02/12/2016	08/12/2016
Realización de las simulaciones parte 2	28/12/2016	02/01/2017
<b>Realización de la memoria</b>	15/12/2016	03/02/2017
Búsqueda de información	15/12/2016	25/01/2017
Redacción del proyecto	27/12/2016	27/01/2017
Correcciones, revisión y formato	30/01/2017	03/02/2017

Tabla 2: Duración de cada una de las tareas en las que se ha dividido la realización del Trabajo Fin de Grado

## Planificación

En la Tabla 2 se pueden observar las tareas principales en las que se ha dividido la realización del Trabajo Fin de Grado, con sus fechas estimadas de inicio y fin. Las tareas más grandes, que implicaban un mayor volumen de trabajo, se han subdividido en tareas más pequeñas, con el fin de poder acotar con mayor facilidad los tiempos estimados de trabajo, aunque en todos los casos se ha dividido de forma que las nuevas tareas tengan un principio y un fin por sí mismas.

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt resultante, donde se puede ver fácilmente la división de las tareas y su distribución en el tiempo. Ha sido realizado con el software libre *GanttProject*.

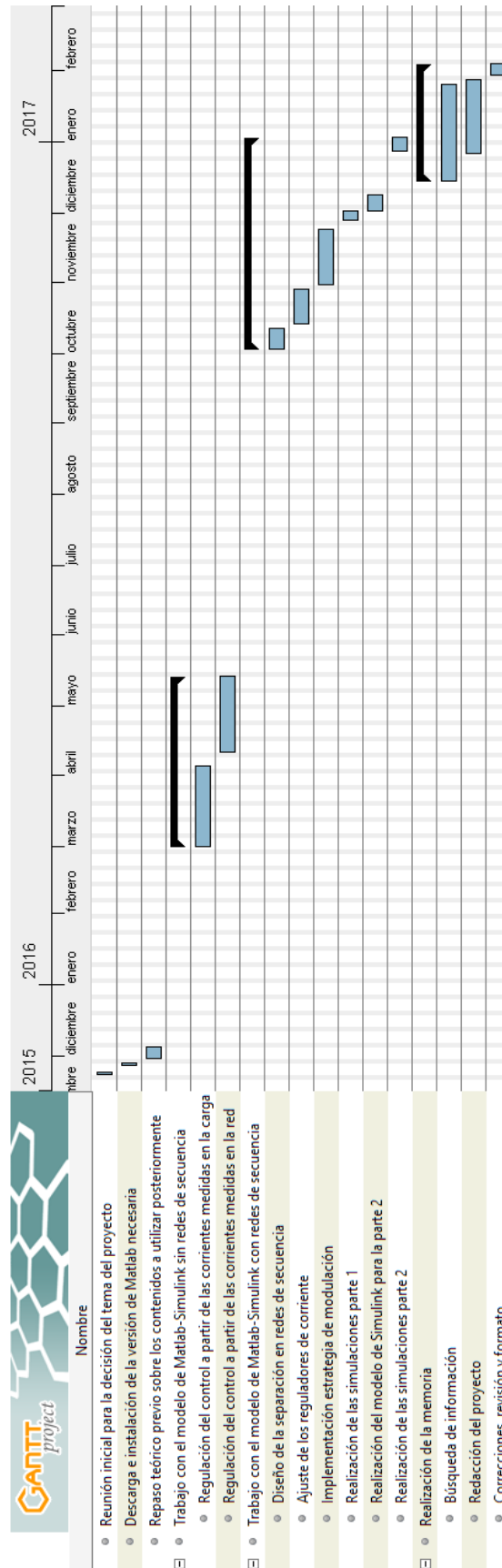


Figura 101: Diagrama de Gantt de la planificación del Trabajo Fin de Grado



## 11. Presupuesto

Para la elaboración del presupuesto, ha sido necesario asignarle a cada tarea en la que se ha dividido el Trabajo Fin de Grado, un peso en horas de trabajo, en función de la dificultad encontrada o de la extensión de la propia tarea. En la Tabla 3 se muestran las horas aproximadas dedicadas a cada una de ellas. Supone un total de 319 horas de trabajo, lo que cumple con el número de horas pedido por la Escuela para la realización de dicho trabajo.

<b>Tarea</b>	<b>Tiempo de dedicación</b>
Reunión inicial para la decisión del tema del proyecto	3 h
Reuniones y trabajo con el tutor del proyecto	70 h
Descarga e instalación de Matlab	5 h
Repaso previo de los contenidos teóricos a utilizar	10 h
Trabajo con el modelo de Simulink sin redes de secuencia	
- Familiarización con el modelo	5 h
- Implantación del modelo de control a partir de la medida en la carga	20 h
- Implantación del modelo de control a partir de la medida en la red	30 h
Trabajo con el modelo de Simulink en redes de secuencia	
- Diseño de la separación en redes de secuencia	6 h
- Ajuste de los reguladores	10 h
- Implementación estrategia modulación	30 h
- Realización simulaciones parte 1	10 h
- Realización del modelo de Simulink para la parte 2	10 h
- Realización simulaciones parte 2	10 h
Realización de la memoria	
- Búsqueda de información	15 h
- Redacción de la memoria	70 h
- Correcciones, revisión y formato	15 h
<b>TOTAL</b>	<b>319 h</b>

Tabla 3: Tiempo de dedicación empleado para el cumplimiento de cada tarea

En cuanto a los programas informáticos empleados, para el desarrollo del trabajo se ha empleado la herramienta Simulink de Matlab. La licencia para la utilización de

## Presupuesto

este programa no es gratuita, pero los alumnos y profesores de la UPM disponemos de una licencia académica gratuita para su utilización, por lo que en este caso el programa no ha supuesto ningún coste. El programa empleado para la realización del diagrama de Gantt es un software libre y, por tanto, gratuito.

En la siguiente tabla se muestra el desglose del presupuesto, separado por conceptos. Al precio fijado por el número de horas de trabajo del alumno, explicado previamente, hay que sumarle el precio debido a las horas de trabajo del tutor del proyecto. Se han estimado 70 horas de trabajo del tutor, a un precio de 65 €/hora. Se establece, por tanto, que el presupuesto final para la realización de este Trabajo Fin de Grado son 20500 €.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Trabajo del alumno (horas)	319	50	15950
Trabajo del tutor (horas)	70	65	4550
Matlab	1	0	0
GanttProject	1	0	0
<b>TOTAL</b>			<b>20500</b>

Tabla 4: Desglose del presupuesto total

## 12. Referencias

- [1] “Approximate Algorithm for Fast Calculating Voltage Unbalance Factor of Three-Phase Power System”- He Wen, Da Cheng.
- [2] Unbalanced Voltage Supply. The damaging effects on three phase induction motors and rectifiers- ABB
- [3] Voltage Unbalance: Power Quality Issues, Related Standars and Mitigation Techniques
- [4] “El método de las componentes simétricas”- Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Mar del Plata
- [5] Transient operation of grid-connected voltage source under unbalanced voltage conditions- G. Saccomando; J. Svensson
- [6] Practical Implementation of Delayed Signal Cancellation for Phase-Sequence Separation- Jan Svensson; Massimo Bongiorno; Ambra Sannino
- [7] Tesis doctoral: “Control directo de potencia de convertidores electrónicos conectados a la red” Joaquín Eloy-García Carrasco





## Anexo I: Código de Matlab de la estrategia de modulación SVM

```

function [sys,x0,str,ts] = svm_sim(t,x,u,flag,Udc,tmin)

% S-function que obtiene una modulación vectorial de inversores
% SVM con secuencia de disparo de los interruptores simétrica,
% reduciendo la tasa de distorsión armónica.
% Divide cada periodo de conmutación en dos semiperiodos,
% de tal forma que se obtiene una secuencia de disparos simétrica
% con el mínimo número de conmutaciones de los interruptores.
% Para que la secuencia sea simétrica tiene en cuenta si el
% vector de referencia se encuentra en un sextante par o impar.
%
% Parámetros:
% Udc: Tensión en el bus de continua
% tmin: Tiempo de disparo mínimo
%
% Entradas:
% u(1): Tensión de entrada ux (eje estático)
% u(2): Tensión de entrada uy (eje estático)
% u(3): Frecuencia de conmutación
%
% Salidas:
% y(1): Tiempo de disparo del interruptor S1
% y(2): Tiempo de disparo del interruptor S2
% y(3): Tiempo de disparo del interruptor S3
% y(4): Tiempo de disparo del interruptor S4
% y(5): Tiempo de disparo del interruptor S5
% y(6): Tiempo de disparo del interruptor S6
%
% Estados:
% x(1): Estado que almacena el número de ciclos de conmutación
%       realizados
% x(2): Sextante en que se encuentra el vector de referencia
% x(3): Tiempo del vector espacial activo i ti
% x(4): Tiempo del vector espacial activo j tj
% x(5): Tiempo del vector nulo t0
%
%
switch flag,

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Initialization %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Update %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u,Udc,tmin);

```

## Anexo I

```
%%%%%%%%%%
% Outputs %
%%%%%%%%%%
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);

%%%%%%%%%%
% Terminate %
%%%%%%%%%%
case { 1,4,9 },
    sys = [];

%%%%%%%%%%
% Unexpected flags %
%%%%%%%%%%
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes

sizes = simsizes;

sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 5;
sizes.NumOutputs = 10;
sizes.NumInputs = 3;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);

x0 = [0 1 0 0 0];

str = [];

ts = [0 0];

function sys=mdlUpdate(t,x,u,Udc,tmin)

PI = 3.1415927;

T = 1/u(3); % Periodo de conmutación

ux = u(1);
uy = u(2);

U = sqrt(ux^2+uy^2); % Módulo de la tensión de referencia

if t < (x(1)*T)
    sys(1) = x(1);
    sys(2) = x(2);
    sys(3) = x(3);
```

## Compensación de desequilibrios mediante convertidores electrónicos de potencia

```

sys(4) = x(4);
sys(5) = x(5);
else
    sys(1) = x(1)+1;

    % Cálculo del ángulo theta

    if (ux == 0)
        ux = 0.000001; % Para evitar división por cero
    end

    theta = atan2(uy,ux);

    if theta < 0
        theta = 2*PI+theta;
    end

    % Cálculo del sextante en que se encuentra y del ángulo gamma
dentro
    % del sector activo

    if (theta >= 0 & theta < PI/3)
        sys(2) = 1; % 1er sextante
        gamma = theta;
    elseif (theta >= PI/3 & theta < 2*PI/3)
        sys(2) = 2; % 2o sextante
        gamma = theta - PI/3;
    elseif (theta >= 2*PI/3 & theta < PI)
        sys(2) = 3; % 3er sextante
        gamma = theta - 2*PI/3;
    elseif (theta >= PI & theta < 4*PI/3)
        sys(2) = 4; % 4o sextante
        gamma = theta - PI;
    elseif (theta >= 4*PI/3 & theta < 5*PI/3)
        sys(2) = 5; % 5o sextante
        gamma = theta - 4*PI/3;
    else
        sys(2) = 6; % 6o sextante
        gamma = theta - 5*PI/3;
    end

    % Índice de modulación

    m = U/(1/sqrt(3)*Udc)

    % Cálculo de los tiempos ti, tj y to (dentro de un semiperiodo)

    ti = m*T/2*sin(PI/3-gamma); % ti
    tj = m*T/2*sin(gamma); % tj
    to = (T/2-(ti+tj))/2; % to

    % Limitación de tiempo mínimo (simular tiempo de conmutación
    % real de un interruptor de potencia)

    if (ti < tmin/2)
        ti = 0;

```

## Anexo I

```
end
if (tj < tmin/2)
    tj = 0;
end
if (t0 < tmin/2)
    t0 = 0;
end

sys(3) = ti;
sys(4) = tj;
sys(5) = t0;
end

function y=mdlOutputs(t,x,u)

T = 1/u(3);
ti = x(3);
tj = x(4);
t0 = x(5);
t7 = t0;
y(7)=ti;
y(8)=tj;
y(9)=t0;
a=sqrt(u(1)^2+u(2)^2);
y(10)=a;

tiempo = t - (x(1)-1)*T;

if (x(2) == 1)
    % ler sextante. Secuencia t0-ti-tj-t7-t7-tj-ti-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti)
        y(1) = 1;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 0;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    end
end
```

```

elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj)
    y(1) = 1;
    y(3) = 1;
    y(5) = 0;
    y(2) = 0;
    y(4) = 0;
    y(6) = 1;
elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj+ti)
    y(1) = 1;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 0;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
else
    y(1) = 0;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 1;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
end
elseif (x(2) == 2)
    % 2o sextante. Secuencia t0-tj-ti-t7-t7-ti-tj-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+tj)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+tj+ti)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;

```

## Anexo I

```
elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti+tj)
    y(1) = 0;
    y(3) = 1;
    y(5) = 0;
    y(2) = 1;
    y(4) = 0;
    y(6) = 1;
else
    y(1) = 0;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 1;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
end
elseif (x(2) == 3)
    % 3er sextante. Secuencia t0-ti-tj-t7-t7-tj-ti-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 1;
```

```

else
    y(1) = 0;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 1;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
end
elseif (x(2) == 4)
    % 4o sextante. Secuencia t0-tj-ti-t7-t7-ti-tj-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+tj)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+tj+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti+tj)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    else
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    end
end

```

## Anexo I

```
end
elseif (x(2) == 5)
    % 5o sextante. Secuencia t0-ti-tj-t7-t7-tj-ti-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    elseif (tiempo <= t0+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj)
        y(1) = 1;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
        y(1) = 1;
        y(3) = 1;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 0;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj)
        y(1) = 1;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 0;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+tj+ti)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 1;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 0;
    else
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
        y(2) = 1;
        y(4) = 1;
        y(6) = 1;
    end
elseif (x(2) == 6)
    % 6o sextante. Secuencia t0-tj-ti-t7-t7-ti-tj-t0
    if (tiempo <= t0)
        y(1) = 0;
        y(3) = 0;
        y(5) = 0;
```



```

    y(2) = 1;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
elseif (tiempo <= t0+tj)
    y(1) = 1;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 0;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
elseif (tiempo <= t0+tj+ti)
    y(1) = 1;
    y(3) = 0;
    y(5) = 1;
    y(2) = 0;
    y(4) = 1;
    y(6) = 0;
elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7)
    y(1) = 1;
    y(3) = 1;
    y(5) = 1;
    y(2) = 0;
    y(4) = 0;
    y(6) = 0;
elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti)
    y(1) = 1;
    y(3) = 0;
    y(5) = 1;
    y(2) = 0;
    y(4) = 1;
    y(6) = 0;
elseif (tiempo <= t0+ti+tj+t7+t7+ti+tj)
    y(1) = 1;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 0;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
else
    y(1) = 0;
    y(3) = 0;
    y(5) = 0;
    y(2) = 1;
    y(4) = 1;
    y(6) = 1;
end
end
end

```



## Anexo II: Código de Matlab para la realización de las transformaciones en redes de secuencia

### II.1 Transformación ab-dq de secuencia directa

```

% Transformada de Park de secuencia directa de las corrientes
%
% Calcula la transformada de Park en secuencia directa a partir de sus
% componentes alfa y beta de secuencia directa, y el ángulo theta de
% giro obtenido a partir del sistema trifásico de tensiones de la red
%
% Entradas:
% u(1) Corriente en eje a de SD
% u(2) Corriente en eje b de SD
% u(3) Ángulo
%
% Salidas:
% y(1) Corriente en eje d de SD
% y(2) Corriente en eje q de SD
%
function [y] = ab_to_dq_SD(u)

% Corrientes de entrada

ia=u(1);
ib=u(2);
theta=u(3);

id = ia*cos(theta)+ib*sin(theta);
iq = -ia*sin(theta)+ib*cos(theta);

y(1)=id;
y(2)=iq;

```

### II.2 Transformación ab-dq de secuencia inversa

```

% Transformada de Park de secuencia inversa de las corrientes
%
% Calcula la transformada de Park en secuencia inversa a partir de sus
% componentes alfa y beta de secuencia inversa, y el ángulo theta de
% giro obtenido a partir del sistema trifásico de tensiones de la red
%
% Entradas:
% u(1) Corriente en eje a de SI
% u(2) Corriente en eje b de SI

```

## Anexo II

```
% u(3) Ángulo
%
% Salidas:
% y(1) Corriente en eje d de SI
% y(2) Corriente en eje q de SI
%
function [y] = ab_to_dq_SI(u)

% Tensiones de línea

ua=u(1);
ub=u(2);
theta=u(3);

ud = ua*cos(theta)-ub*sin(theta);
uq = ua*sin(theta)+ub*cos(theta);

y(1)=ud;
y(2)=uq;
```

### II.3 Transformada dq-ab de secuencia directa

```
% Transformada de la tensión a ejes estáticos alfa-beta a partir de
las
% tensiones d-q de secuencia directa obtenidas a la salida de los
% reguladores
%
% Entradas:
% u(1) Tensión en eje d de SD
% u(2) Tensión en eje q de SD
% u(3) Ángulo theta de giro de los ejes dq
%
% Salidas:
% y(1) Tensión en eje alfa de SD
% y(2) Tensión en eje beta de SD
%
function [y] = dq_to_ab_SD(u)

ud = u(1);
uq = u(2);
theta = u(3);

u_alfa = ud*cos(theta)-uq*sin(theta);
u_beta = ud*sin(theta)+uq*cos(theta);

y(1) = u_alfa;
y(2) = u_beta;
```

## II.4 Transformada dq-ab de secuencia inversa

```

% Transformada de la tensión a ejes estáticos alfa-beta a partir de
las
% tensiones d-q de secuencia inversa obtenidas a la salida de los
% reguladores
%
% Entradas:
% u(1) Tensión en eje d de SI
% u(2) Tensión en eje q de SI
% u(3) Ángulo theta de giro de los ejes dq
%
% Salidas:
% y(1) Tensión en eje alfa de SI
% y(2) Tensión en eje beta de SI
%
%
function [y] = dq_to_ab_SI(u)

ud = u(1);
uq = u(2);
theta = u(3);

u_alfa = ud*cos(theta)+uq*sin(theta);
u_beta = -ud*sin(theta)+uq*cos(theta);

y(1) = u_alfa;
y(2) = u_beta;

```

## II.5 Obtención del ángulo theta de giro

```

% Obtención del ángulo theta
%
% Calcula el ángulo theta de giro
% del sistema dq obtenido a partir del sistema
% trifásico de tensiones de la red
%
% Entradas:
% u(1) Tensión RN
% u(2) Tensión SN
% u(3) Tensión TN
%
% Salidas:
% y(1) Ángulo theta

function [y] = theta(u)

% Tensiones de línea

urn = u(3);
usn = u(4);

```

## Anexo II

```
utn = u(5);

% Transformada a ejes estáticos alfa-beta

ua = 2/3*(urn-1/2*usn-1/2*utn);
ub = 2/3*sqrt(3)/2*(usn-utn);

if (ua == 0)
    ua = 0.000001; % Para evitar la división por 0 al hacer el atan
end

% Cálculo del ángulo theta

theta = atan2(ub,ua);

if theta < 0
    theta = 2*pi+theta;
end

% Salida

y(1)=theta;
```